



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE LUÍS EDUARDO MAGALHÃES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GABRIELA DIAS BRITO

**ELEMENTOS DE ATIVAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO
EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA NA REGIÃO OESTE DA BAHIA**

LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

2020

GABRIELA DIAS BRITO

**ELEMENTOS DE ATIVAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO
EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA NA REGIÃO OESTE DA BAHIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Oeste da Bahia,
Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo
Magalhães, como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof^o. Msc. Adriano David
Monteiro de Barros

Coorientador: Prof^o. Dr. Pedro Dias Pinto

LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

B862 Brito, Gabriela Dias.

Elementos de ativação da economia circular: estudo de caso em uma indústria alimentícia na região oeste da Bahia. / Gabriela Dias Brito. – 2020.

80 f.; il.

Orientador: Prof. Me. Adriano David Monteiro de Barros.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar do *Campus* de Luis Eduardo Magalhães, Luis Eduardo Magalhães, BA, 2020.

1. Administração de Produção. 2. Economia Circular – Indicadores de Produtividade. 3. Indústria Alimentícia – Bahia, Região Oeste.

I. Barros, Adriano David Monteiro de. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar do *Campus* de Luis Eduardo Magalhães. III. Título.

CDD: 658.5

BIBLIOTECAS UFOB - Biblioteca Universitária de Luis Eduardo Magalhães



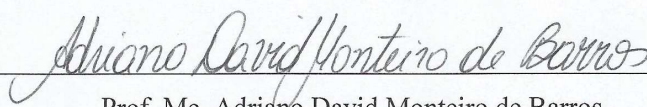
GABRIELA DIAS BRITO

**ELEMENTOS DE ATIVAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR: ESTUDO DE CASO
EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA NA REGIÃO OESTE DA BAHIA**

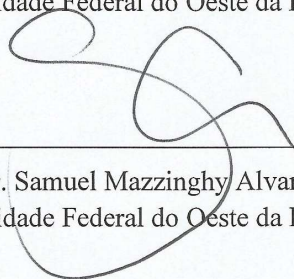
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Oeste da Bahia,
Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo
Magalhães, como requisito parcial para a
obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Luís Eduardo Magalhães, 27 de janeiro de
2020.

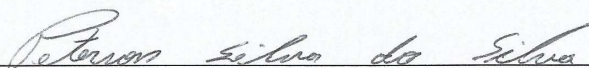
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Adriano David Monteiro de Barros
Universidade Federal do Oeste da Bahia



Prof. Dr. Samuel Mazzinghy Alvarenga
Universidade Federal do Oeste da Bahia



Prof. Me. Peterson Silva da Silva
Universidade Federal do Oeste da Bahia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio incondicional.

A esta universidade e seu corpo docente, em especial aos meus orientadores Msc. Adriano David Monteiro de Barros e Dr. Pedro Dias Pinto pelo suporte e incentivo durante a graduação.

A minha irmã, meus amigos, meu companheiro, a mim e a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, na construção deste trabalho.

RESUMO

A Economia Circular é definida como um modelo econômico que incorpora fluxos restauradores nos sistemas de produção para otimizar o uso e produção de recursos e resíduos podendo promover diversos benefícios para as indústrias, que estão cada vez mais preocupadas com a adoção de sistemas sustentáveis de produção. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo identificar os elementos que podem ativar a Economia Circular em uma indústria alimentícia analisando indicadores de circularidade a partir de um estudo de caso em uma cadeia de suprimentos avícola localizada na Região Oeste da Bahia. A metodologia utilizada classifica-se como exploratória, descritiva e combinada. Inicialmente, índices de circularidade para massa e energia foram obtidos com base no indicador proposto por Barros (2019). Verificou-se que menos da metade dos fluxos de materiais na cadeia se mantinham recirculando e que a circularidade energética da indústria é de apenas 4%. A partir da análise detalhada dos fluxos de massa e energia, foi possível identificar elementos ativadores da Economia Circular, sendo os principais a produção de biogás a partir dos resíduos da cama de frango para geração de energia elétrica e as relações sinérgicas entre granjas e propriedades rurais e entre abatedouro e indústrias de biocombustíveis. O modelo de Economia Circular proposto aumentou a circularidade da cadeia para 85% em termos de massa e 27% em termos de energia em contraste com 49% e 4% de circularidade, respectivamente. Entretanto, verificou-se que o índice de circularidade utilizado se mostrou inadequado para analisar fluxos de massa e energia em conjunto. Por esse motivo, um novo indicador de circularidade que considera os limites termodinâmicos e combina os fluxos de energia e massa foi proposto nesse trabalho, visto que não foram encontradas pesquisas quantitativas que considerem os limites físicos da Economia Circular. O cálculo do indicador mostrou que a circularidade da cadeia é de cerca de 40%, tendo potencial de aumentar para 57% se a proposta do modelo de Economia Circular for adotada. Além disso, o indicador proposto exibiu que a intensidade de energia empregada na produção utilizando massa reaproveitada pode reduzir-se pela metade se comparado a energia utilizada no processamento utilizando-se apenas massa primária.

Palavras-chave: Economia Circular. Termodinâmica. Circularidade. Indústria Alimentícia.

ABSTRACT

Circular Economy is defined as an economic model that incorporates restorative flows in production systems to optimize the use and production of resources and waste, and can promote several benefits for industries, which are increasingly concerned with the adoption of sustainable production systems. In light of this, the present work aims to identify the elements that can activate Circular Economy in a food industry by analyzing circularity indicators from a case study in a poultry supply chain located in the Western Region of Bahia. The methodology used is classified as exploratory, descriptive and combined. Initially, circularity indexes for mass and energy were obtained based on the indicator proposed by Barros (2019). It was found that less than half of the material flows in the chain were kept recirculating, and that the energy circularity of the industry is only 4%. From the detailed analysis of the mass and energy flows, it was possible to identify activating elements of the Circular Economy, the main ones being the production of biogas from the residues of the chicken litter to generate electricity and the synergistic relationships between farms and rural properties. and between slaughterhouse and biofuel industries. The proposed Circular Economy model increased the circularity of the chain to 85% in terms of mass and 27% in terms of energy in contrast to 49% and 4% of circularity, respectively. However, it was found that the circularity index used was inadequate to analyze mass and energy flows together. For this reason, a new circularity indicator that considers thermodynamic limits and combines energy and mass flows was proposed in this work, since no quantitative research was found that considers the physical limits of de Circular Economy. The calculation of the indicator showed that the circularity of the chain is around 40%, with the potential to increase to 57% if the Circular Economy model proposal is adopted. In addition, the proposed indicator showed that the intensity of energy used in production using reused mass can be halved if compared to the energy employed in processing using only primary mass.

Keywords: Circular Economy. Thermodynamics. Circularity. Food industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cadeia de suprimentos da indústria alimentícia.	34
Figura 2 - Classificação da pesquisa.	37
Figura 3 - Condução do Estudo de Caso.	38
Figura 4 - Índice de circularidade de matéria das unidades produtivas da indústria avícola. ..	44
Figura 5 - Evolução do índice de circularidade de matéria das unidades produtivas da indústria avícola.....	45
Figura 6 - Evolução do índice de circularidade material da indústria avícola.	46
Figura 7 - Índice de circularidade energética das unidades produtivas da indústria avícola....	48
Figura 8 - Evolução do índice de circularidade energética das unidades produtivas da indústria avícola.....	49
Figura 9 - Modelo de Economia Circular para a indústria avícola.....	55
Figura 10 - Circularidade da cadeia de suprimentos no modelo circular.	56
Figura 11 - Comparativo de circularidade de massa: modelo atual versus modelo circular.	57
Figura 12 - Circularidade energética para a cadeia de suprimentos no modelo circular.....	57
Figura 13 - Comparativo de circularidade de energia: modelo atual versus modelo circular. .	58
Figura 14 - Indicador de circularidade m em função da fração de massa secundária r	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência para materiais e energia.....	40
Tabela 2 - Equivalência energética entre diversas fontes de energia.	40
Tabela 3 - Circularidade para processos e organização em termos de material.....	43
Tabela 4 - Circularidade para processos e organização em termos de energia.	47
Tabela 5 - Média de consumo de energia elétrica e retirada de cama de frango.....	51
Tabela 6 - Potencial produção de biogás e energia elétrica a partir da utilização da cama de frango.....	52
Tabela 7 - Despesas e receitas envolvidas na venda de cama de frango e consumo de energia elétrica.	53
Tabela 8 – Circularidade da indústria avícola.	64
Tabela 9 – Circularidade da indústria avícola economicamente circular.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Indicadores e métricas relacionados à Economia Circular.....	28
Quadro 2 - Métodos de Pesquisa adotados na Engenharia de Produção	37
Quadro 3 - Relação dos artigos utilizados como referência para a pesquisa.....	39

LISTA DE SIGLAS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ABIA	Associação Brasileiro da Indústria de Alimentos
CNI	Confederação Nacional da Indústria
EC	Economia Circular
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
PIB	Produto Interno Bruto
CPI	Indicador de Desempenho da Economia Circular
ICAR	Índice Circonômico de Águas Residuais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	REVISÃO CONCEITUAL	17
2.1	ECONOMIA CIRCULAR	17
2.2	ECONOMIA CIRCULAR NA CADEIA DE SUPRIMENTOS	21
2.2.1	Economia Circular na Indústria	22
2.3	INDICADORES DE ECONOMIA CIRCULAR.....	25
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	32
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	33
3.2	PROCEDIMENTOS.....	38
3.3	CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	INDICADORES QUANTITATIVOS DE CIRCULARIDADE.....	42
4.2	OPORTUNIDADES DE ATIVAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR.....	50
4.3	ANÁLISE TERMODINÂMICA DA CIRCULARIDADE	58
4.3.1	Considerações de massa e energia	59
4.3.2	Restrições termodinâmicas de eficiência da circularidade	61
4.3.3	Proposta de indicador termodinâmico	63
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
	REFERÊNCIAS	69
	APENDICE A	81

1 INTRODUÇÃO

A poluição, o desmatamento, o esgotamento de recursos, a mudança climática e a ameaça à vida selvagem são algumas das preocupações ecológicas mais sérias em todo o mundo, atualmente, e o alcance de um crescimento sustentável está entre os principais desafios enfrentados pelas economias (HANIF; GAGO-DE-SANTOS, 2017).

No modelo econômico convencional, a atenção centra-se no valor dos produtos econômicos, enquanto o esgotamento dos recursos naturais e a acumulação resultante dos resíduos econômicos são normalmente ignorados (GEORGE; LIN; CHEN, 2015). Um paradigma de crescimento econômico excessivo provoca um esgotamento indesejado de recursos e está em desacordo com a sustentabilidade, provocando a degradação do meio ambiente (SALIMATH; CHANDNA, 2018).

Convencionalmente, o setor industrial adota o modelo linear de produção que é baseado na entrada de recursos naturais em uma extremidade do processo e saída de produtos econômicos na outra extremidade e ignora a limitação física dos recursos naturais, gerando diversos prejuízos ambientais (GEORGE; LIN; CHEN, 2015).

A indústria é uma das características dominantes da sociedade moderna e possui algumas externalidades negativas resultantes do modo de produção e consumo, destacando-se a poluição e o alto consumo de energia e recursos naturais (JURAS, 2015). Estima-se que 170 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) são emitidas pelo setor industrial brasileiro. Até 2050, a expectativa é que esse número duplique (SANTOS; DUBEUX; PEREIRA JUNIOR, 2015).

No setor alimentício, a estimativa é de que as emissões de gases poluentes ultrapassam 5 milhões de toneladas atualmente (SANTOS; DUBEUX; PEREIRA JUNIOR, 2015). No âmbito socioambiental, segundo a Fundação Ellen Macarthur (2017b), a sociedade gasta o dobro do que gasta com alimentos em problema de saúde, ambientais e econômicos.

Na tentativa de diminuir o uso de recursos naturais e os encargos ambientais gerados pelos sistemas de produção, recentemente, as indústrias de manufatura começaram a adotar práticas sustentáveis de fabricação (MOKTADIR *et al.*, 2018a; PAGOTTO; HALOG, 2016)

Uma alternativa para alcançar esses objetivos é a Economia Circular, que é considerado um sistema econômico adequado para realizar a transição dos atuais modelos econômicos para modelos de natureza mais sustentáveis (MARTÍN GÓMEZ; AGUAYO GONZÁLEZ; MARCOS BÁRCENA, 2018). Práticas de fabricação sustentáveis baseadas em uma Economia Circular podem reduzir a geração de resíduos e o uso de energia e material (MOKTADIR *et al.*, 2018b).

No setor alimentício, a adoção dos princípios da Economia Circular pode modificar o sistema alimentar global, fornecendo alimentos cultivados de modo regenerativo, comercializando produtos mais saudáveis e eliminando o desperdício ao transformar resíduos em matérias-primas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Portanto, a adoção de princípios da Economia Circular tem potencial de gerar impactos positivos para as indústrias alimentícias de modo que resíduos podem ser reaproveitados e a energia pode ser consumida com maior eficiência, gerando vantagem competitiva e maior agregação de valor interno dos recursos.

Contudo, apesar dos benefícios, a Economia Circular vem enfrentando dificuldades na sua implementação. A falta de pressões regulatórias, de educação e cultura de proteção ambiental e de pressões e demandas dos mercados impedem a adoção dos modelos de negócio circulares (HART *et al.*, 2019; KIRCHHERR *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019).

Além das barreiras, o crescimento da Economia Circular é limitado por fatores termodinâmicos e de sistema, pois a biosfera terrestre é um sistema aberto que transforma energia em trabalho, desperdiçando parte da energia utilizada, como ditado pela segunda lei da termodinâmica (SKENE, 2018).

A segunda lei da termodinâmica mostra que todo processo ou projeto do tipo Economia Circular deve ser cuidadosamente analisado por sua contribuição à sustentabilidade ambiental, pois não existe 100% de eficiência energética (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018). Deste modo, as leis da termodinâmica estabelecem que um crescimento com resíduos zero é impossível de obter (PELOROSSO; GOBATTONI; LEONE, 2017).

Nesse contexto, o presente trabalho analisa como a Economia Circular pode ser ativada numa indústria alimentícia a partir dos dados dos fluxos de massa e energia de uma organização localizada no oeste da Bahia. Fundamentado na literatura, este estudo parte do seguinte problema de pesquisa: **Quais elementos podem ativar a Economia Circular em uma indústria de transformação a partir dos fluxos de material e energia no processo produtivo?**

O objetivo é identificar elementos, definidos como fluxos de material e energia que são vendidos ou adquiridos do exterior da cadeia de suprimentos e apresentam oportunidade de internalização (BARROS, 2019), que podem tornar o ciclo produtivo circular e regenerativo através de indicadores termodinâmicos, considerando as leis da termodinâmica que dizem respeito ao consumo energético. Este estudo busca contribuir para o incentivo das organizações em adotar princípios e modelos de negócio circulares, mediante a viabilidade física dos processos ambientalmente corretos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Identificar os elementos que podem ativar a Economia Circular em uma indústria alimentícia através de indicadores de circularidade.

1.1.2 Objetivos específicos

- Compreender o sistema produtivo e a cadeia de suprimentos em que está inserida uma indústria alimentícia.
- Analisar o panorama atual da implementação da Economia Circular no setor industrial.
- Identificar as ineficiências do ciclo de vida produtivo e os impactos ambientais de uma indústria de transformação.
- Identificar medidas de circularidade para atividades industriais com base na eficiência energética.
- Propor atividades circulares considerando os limites termodinâmicos relativos ao consumo energético.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a Fundação Ellen Macarthur (2017), o sistema alimentar atual não possui um modelo de produção adequado para atender às necessidades de longo prazo do desenvolvimento econômico e da população. Metade dos custos gerados com os ganhos de produtividade, cerca de 5,7 trilhões de dólares anuais, são resultado direto da produção linear, que extrai recursos finitos, polui e prejudica os sistemas naturais.

Estima-se que para cada dólar gasto em alimentos, a sociedade paga dois dólares em custos de saúde, ambientais e econômicos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). De acordo com Santos, Dubeux e Pereira Junior (2015), mais de 5 milhões de toneladas de gases poluentes são emitidos pelo setor de alimentos e bebidas e cerca de 21 milhões de toneladas de petróleo são utilizados no consumo energético. A previsão é de que as emissões de gases tripliquem e o consumo energético duplique até 2050.

Diante desses números, a produção de alimentos que não agride o meio ambiente e apresenta alto retorno econômico é uma das preocupações atuais da indústria alimentícia (LASO *et al.*, 2018). A Economia Circular pode eliminar essa preocupação ao conciliar crescimento econômico e sustentabilidade a partir da adoção de modelos de negócios circulares (BRESSANELLI; PERONA; SACCANI, 2017).

O mais relevante é que as análises e discussões sobre a Economia Circular e seu desenvolvimento são realizadas, na maior parte das vezes, de uma perspectiva de escassez de recursos e impacto ambiental, deixando em falta os benefícios econômicos dos atores industriais em geral e especificamente no nível individual. Essa lacuna no cenário de pesquisa da Economia Circular é crítica, considerando o fato de que atividades essenciais para a implementação bem-sucedida são determinadas por empresas de manufatura com a motivação subjacente de obter benefícios econômicos (LIEDER; RASHID, 2016).

Esses fatores dificultam a transição da economia linear para circular, já que as empresas podem não estar cientes da criação de valor potencial associada ao fechamento de *loops* e à exploração de resíduos (ZAOUAL; LECOCQ, 2018). Nas cadeias de suprimentos agroalimentares de circuito fechado existe um alto potencial para reduzir custos ambientais e econômicos resultantes do descarte de resíduos alimentares (BORRELLO *et al.*, 2016), pois, estima-se que para cada dólar investido na redução, há uma economia de 14 dólares em custos operacionais (PRINCIPATO *et al.*, 2019).

Deste modo, espera-se que o presente trabalho desdobre os impactos da atuação da Economia Circular no setor alimentício ao identificar oportunidades de manter materiais recirculando internamente, gerando maior agregação de valor e contribuindo na promoção da autossuficiência e regenerabilidade da indústria.

O presente estudo justifica-se, também, pela sua originalidade, pois a busca bibliográfica realizada mostrou que não existem aplicações da Economia Circular que considerem os limites de eficiência energética no ciclo produtivo. Tendo em vista a originalidade dessa iniciativa, as contribuições direcionam-se não só para o meio científico, mas para organizações que desejam promover a Economia Circular em termos da análise do consumo energético.

Além disso, o trabalho se justifica pela relevância no setor industrial, que é responsável por inúmeros impactos ambientais. A identificação e consequente inserção de práticas circulares no setor pode trazer benefícios ambientais, sociais e econômicos e fomentar o aumento da eficiência energética. Portanto, este estudo considera interessantes oportunidades

de Economia Circular aplicadas na indústria que podem auxiliar a consolidação do conceito no aspecto teórico da literatura e disseminação das práticas circulares de negócio.

2 REVISÃO CONCEITUAL

2.1 ECONOMIA CIRCULAR

O modelo linear de produção, caracterizado por fluxos unidirecionais de matéria e energia, é o mais empregado atualmente, sendo também chamado de modelo convencional (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018). Os primeiros indícios de utilização desse tipo de modelo econômico surgiram no século XVII, durante a revolução industrial a partir das inovações científicas que ignoravam os potenciais danos ambientais que poderiam ser causados (PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018).

O modelo convencional é baseado na extração e transformação de recursos do sistema original, que são consumidos no subsistema econômico humano e retornam à natureza através de resíduos e emissões em concentrações prejudiciais (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018). Segundo George, Lin e Chen (2015), esse ciclo acontece devido a economia de mercado ser voltada para o valor dos produtos econômicos.

Nas atividades econômicas lineares, o esgotamento dos recursos naturais e o consequente aumento de resíduos econômicos são ignorados, causando uma diminuição física do ecossistema e apontando para a necessidade de um gerenciamento eficiente e eficaz de recursos e resíduos (GEORGE; LIN; CHEN, 2015; KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018; PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018).

É devido a esses fatores que a necessidade de integrar sustentabilidade e desenvolvimento de negócios através do conceito de Economia Circular está cada vez mais emergente (RITZÉN; SANDSTRÖM, 2017), tanto no âmbito acadêmico quanto profissional (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017; KORHONEN *et al.*, 2018; LIEDER; RASHID, 2016; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017; PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018; REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018).

Segundo Kirchherr, Reike e Hekkert (2017), a Economia Circular pode ser definida como um sistema econômico que incorpora o conceito de atividades circulares e substitui o conceito de fim da vida de um produto por redução, reutilização e reciclagem de materiais nos processos de produção, distribuição e consumo.

Prieto-Sandoval, Jaca e Ormazabal (2018) corroboram que as atividades econômicas circulares são parte de um sistema que visa impedir o esgotamento de recursos, fechar laços de energia e materiais e facilitar o desenvolvimento sustentável. Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018) observam que a Economia Circular limita o fluxo de produção a um nível que a natureza tolera e contribui com o desenvolvimento sustentável ao concentrar-se em utilizar fontes renováveis de recursos e no gerenciamento preciso de resíduos (BOCKEN *et al.*, 2016; MAVI; MAVI, 2019).

A fundação Ellen MacArthur refere-se à Economia Circular como uma economia industrial que é restauradora por intenção e baseia-se em três princípios: (i) preservar e aumentar o capital natural; (ii) otimizar a produção de recursos, tanto no nível biológico quanto técnicos; (iii) fomentar a eficácia do sistema excluindo externalidades negativas dos projetos (ELLEN MCARTHUR FOUNDATION, 2017a).

Em resumo, a Economia Circular é um modelo econômico para maximizar o funcionamento do ecossistema ao visar a criação de sistemas de produção autossustentáveis (GENOVESE *et al.*, 2017; MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017), exigindo inovações ambientais cíclicas e regenerativas nas formas de produção e consumo da sociedade (PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018).

No que se refere à implementação, o comportamento da Economia Circular nas empresas é gradual, se iniciando com atividades que envolvem medidas de controle e terminando com a implementação de práticas preventivas, que permanecem dentro da empresa e não em toda a cadeia de suprimentos (GARCÉS-AYERBE *et al.*, 2019; MASI *et al.*, 2018).

As práticas mais adotadas são relacionadas à eficiência na utilização de recursos e energia, enquanto práticas relacionadas à recuperação de investimentos, compras ecológicas e cooperação com clientes são menos prevalentes (MASI *et al.*, 2018).

Os benefícios gerados pela aplicação de elementos circulares em modelos de negócios são diversos (CUSENZA *et al.*, 2019; KUMAR *et al.*, 2019; XUE *et al.*, 2019). Em resposta a crescente conscientização ambiental, a legislação ambiental e a necessidade de responsabilidade social, a Economia Circular contribui para uma sociedade ambientalmente responsável e socialmente igual (KUMAR *et al.*, 2019).

Ao estudar a reutilização de baterias como sistemas de armazenamento estacionário em edifícios residenciais, Cusenza *et al.* (2019) mostraram que é possível melhorar a sustentabilidade ambiental geral dos dois sistemas considerados. Os resultados indicaram que os impactos ambientais diminuem cerca de 4% na demanda acumulada de energia e 17% no potencial de esgotamento abiótico.

Xue *et al.* (2019) mostraram que a adoção de um modelo econômico circular pode reduzir efetivamente o potencial de aquecimento global e gerar benefícios econômicos ao minimizar as emissões de carbono. Os autores estudaram a criação de porcos em uma província, na China, e estimaram que 3.091.891,8 t de dióxido de carbono seriam mitigados com a utilização dos excrementos suínos para geração de biogás, o que geraria um benefício econômico de mais de trinta milhões de dólares no comércio de carbono.

Socio politicamente, espera-se a abertura de novas oportunidades de emprego e o fortalecimento das relações entre a sociedade e a indústria. Quando se trata de oportunidades econômicas, se espera reduzir custos por meio de cadeias de suprimentos sustentáveis e gerenciamento de fim de vida (KUMAR *et al.*, 2019).

São tais benefícios os fatores que incentivam a implementação dos princípios da Economia Circular nas organizações, assim como apresentado por Agyemang *et al.* (2019) ao identificar os principais fatores envolvidos na implementação da Economia Circular na indústria automobilística, sendo que benefícios econômicos representam mais de 50% das motivações e a preocupação com o meio ambiente corresponde a 19% dos motivos que levaram à adoção de atividades circulares.

Os indícios obtidos por Agyemang *et al.* (2019) de que a adoção da Economia Circular pelas organizações é motivada, fundamentalmente, por questões econômicas são corroborados pela pesquisa de Masi *et al.* (2018), que mostrou que a Economia Circular é motivada por considerações econômicas e não ambientais.

Globalmente, Jesus e Mendonça (2018) observaram que a Economia Circular é impulsionada, principalmente, pelos fatores sociais, regulatórios e institucionais confirmando a assertiva de Govindan e Hasanagic (2018) de que a Economia Circular pode ser promovida através de leis, políticas, redução de riscos e governança estrita e de que o governo tem um papel importante em relação à implementação da Economia Circular na cadeia de suprimentos.

Os órgãos governamentais, além de atuar no enquadramento institucional, têm papel importante no apoio a área de Pesquisa & Desenvolvimento e no aumento da conscientização social, que ainda se mostra como uma barreira à implementação da Economia Circular (DE JESUS; MENDONÇA, 2018; GOVINDAN; HASANAGIC, 2018).

Segundo Agyemang *et al.* (2019) e Kumar *et al.* (2019), o baixo nível de conscientização pública sobre a Economia Circular e a falta de compreensão dos seus princípios é a principal barreira sociopolítica no setor manufatureiro. Singh e Giacosa (2019) explicam que essa barreira seria causada pelo fato de que os consumidores têm uma conotação negativa com os diferentes modelos de negócios circulares, que não estariam atendendo suas necessidades.

Na China, a falta de pressões regulatórias, de educação e cultura de proteção ambiental e de pressões e demandas dos mercados são vistas como as principais barreiras à Economia Circular (ZHANG *et al.*, 2019). Kirzherr *et al.* (2018) ressalta essas barreiras são impulsionadas pela falta de intervenções governamentais sinérgicas para acelerar a transição para uma Economia Circular. Deste modo, o governo deve acelerar as pressões regulatórias e a educação ambiental.

Do ponto de vista econômico, o alto custo inicial do investimento, o financiamento e o custo benefício são as barreiras de implementação (GARCÉS-AYERBE *et al.*, 2019; MASI *et al.*, 2018). No geral, são as questões culturais e financeiras de mercado aliadas as dificuldades de demonstrar um forte argumento comercial para modelos circulares os obstáculos reais a uma economia mais circular (HART *et al.*, 2019).

No seu sentido mais amplo, a Economia Circular possui limitações que precisam ser compreendidas devido a sua importância crítica (VAN SCHALKWYK *et al.*, 2018). As principais foram identificadas por Korhonen, Honkasalo e Seppälä (2018), sendo os limites termodinâmicos e do sistema os mais relevantes, pois impedem a Economia Circular de contribuir com a sustentabilidade global.

São os problemas termodinâmicos e relacionados ao sistema que permitem a biosfera funcionar de maneira diferente da noção de Economia Circular. Em termos termodinâmicos, o planeta Terra é um sistema aberto e não possui semelhança com qualquer conceito de circuito fechado e circularidade. Pelo contrário, sob os auspícios da segunda lei da termodinâmica, parte da energia do planeta é desperdiçada nos processos de transformação, impossibilitando a circularidade de todo o fluxo energético (SKENE, 2018).

A segunda lei da termodinâmica mostra que todo processo ou projeto do tipo Economia Circular deve ser cuidadosamente analisado por sua contribuição à sustentabilidade ambiental. Um fluxo cíclico não garante um resultado sustentável, pois qualquer atividade requer energia e máquinas que funcionam com energia. O processo de fabricação da máquina exige ainda energia e materiais e produz resíduos e subprodutos, pois não existe 100% de eficiência energética (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018).

As leis da termodinâmica estabelecem que um crescimento com resíduos zero é impossível de obter (PELOROSSO; GOBATTONI; LEONE, 2017). Portanto, o conceito de desperdício na Economia Circular não pode ser limitado a considerações de materiais e objetos, mas de energia. A produção de lixo energético está na base do ecossistema e do funcionamento econômico (SKENE, 2018).

Deste modo, para usufruir plenamente do potencial da Economia Circular, é necessário o desenvolvimento de medições dos dados termodinâmicos para melhorar as estimativas de eficiência de recursos da Economia Circular, pois os conceitos de entropia, termodinâmica e transferência de massa e calor afetam fundamentalmente tanto a circularidade quanto a viabilidade econômica do sistema, apesar de serem negligenciados na maioria dos trabalhos (VAN SCHALKWYK *et al.*, 2018).

2.2 ECONOMIA CIRCULAR NA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Uma cadeia de suprimentos consiste no conjunto das partes envolvidas, direta ou indiretamente, no atendimento de uma solicitação do cliente, incluindo fabricantes, fornecedores, transportadores, armazéns, varejistas e clientes, conectados através do fluxo de produtos, informações e valores econômicos (BASAK *et al.*, 2014).

Para produzir valor na forma de produtos e serviços ao consumidor final, as relações entre os elos e os fluxos de recursos são gerenciados através do gerenciamento da cadeia de suprimentos, definido como uma abordagem holística para gerenciar além das fronteiras das empresas e dos processos (SLACK; BRANDON-JONES, 2018).

Em geral, as cadeias de suprimentos adotam um conceito unidirecional de produção, em que recursos naturais entram em uma extremidade do processo e produtos econômicos emergem na outra extremidade. O esgotamento dos recursos naturais e o consequente acúmulo de resíduos econômicos são normalmente ignorados (GEORGE; LIN; CHEN, 2015).

Na tentativa de integrar as preocupações ambientais nas organizações e reduzir consequências negativas não intencionais no ambiente dos processos de produção e consumo, recentemente, práticas verdes e sustentáveis de gerenciamento da cadeia de suprimentos foram desenvolvidas (GENOVESE *et al.*, 2017).

O gerenciamento verde da cadeia de suprimentos pode fortalecer a competitividade dos níveis organizacionais, como aumento dos benefícios econômicos da empresa, diminuição da poluição ambiental e melhoria da eficiência na utilização dos recursos, de modo a permitir o alcance do desenvolvimento sustentável (YING; LI-JUN, 2012).

A integração dos conceitos de gerenciamento da cadeia de suprimentos e Economia Circular é uma das abordagens para promover o desenvolvimento sustentável das empresas (ZENG *et al.*, 2017a), pois, a Economia Circular é uma cadeia de suprimentos em circuito fechado que se concentra nos aspectos restauradores e regenerativos (RAJEEV *et al.*, 2017)

Os princípios da Economia Circular sugerem que as fronteiras da sustentabilidade ambiental possam ser superadas, enfatizando a ideia de transformar produtos de tal maneira que haja relações viáveis entre sistemas ecológicos e crescimento econômico (NASIR *et al.*, 2017).

A Economia Circular é uma proposta que pode resultar em impactos positivos, como redução da demanda por matérias-primas, consumo reduzido de recursos básicos e criação de empregos, além de impedir impactos negativos resultantes da exploração e processamento de recursos naturais (XAVIER *et al.*, 2019).

Além de vantagens ambientais, a transição de um sistema de produção linear para um modelo de Economia Circular pode proporcionar um melhor posicionamento competitivo dos participantes através de incentivos ao desenvolvimento sustentável que combinem questões ambientais e econômicas (WINKLER, 2011).

Cadeias de suprimentos circulares permitem a formação de um sistema de compartilhamento de recursos simbióticos industriais e sistema de troca de resíduos, criando um ciclo de material em circuito fechado que permita a utilização de energia em vários níveis e a eliminação de desperdícios (ZENG *et al.*, 2017b).

A Economia Circular pode operar em cadeias de suprimentos do nível micro, que envolve empresas e consumidores, meso, que se refere a agentes econômicos integrados em simbiose e macro, referente a cidades, regiões e governos, com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável, criando simultaneamente qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

A transição para um regime de Economia Circular em funcionamento requer uma mudança sistêmica em vários níveis, incluindo inovação tecnológica, novos modelos de negócios e colaboração das partes interessadas (WITJES; LOZANO, 2016). Com base nisso, as iniciativas de Economia Circular devem facilitar a cooperação ativa entre os atores de uma cadeia de suprimentos para que se obtenha redes bem-sucedidas (CARDOSO DE OLIVEIRA *et al.*, 2019). De modo geral, a Economia Circular fortalece a consciência de conservação de recursos e proteção ambiental, promovendo a implementação da estratégia de gerenciamento da cadeia de suprimentos ecológica (YING; LI-JUN, 2012).

2.2.1 Economia Circular na Indústria

As atividades industriais são responsáveis por “21,6% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, respondendo por 70,8% das exportações, 67,4% do investimento empresarial em pesquisa e desenvolvimento e 34,2% dos tributos federais” (CNI, 2019, p.1), sendo o setor

alimentício um dos maiores ao deter 9,6% do PIB e ser o maior empregador industrial gerando 1,6 milhão de empregos diretos (ABIA, 2019). Entretanto, ao mesmo tempo que gera benefícios econômicos, a atividade industrial influencia o ambiente natural negativamente através da geração de resíduos em um sistema linear de produção (LIEDER; RASHID, 2016).

Na indústria de alimentos, a produção que não agride o meio ambiente e apresenta alto retorno econômico é uma das preocupações emergentes (LASO *et al.*, 2018). Por esse motivo, sistemas de produção sustentáveis e eficientes são fundamentais para manter a competitividade da indústria, diminuir o uso de recursos naturais e reduzir os encargos ambientais criados pelos sistemas de produção (PAGOTTO; HALOG, 2016).

A fim de alcançar esses objetivos, a Economia Circular é considerada uma maneira adequada de realizar a transição dos atuais modelos econômicos para modelos de natureza mais sustentáveis (MARTÍN GÓMEZ; AGUAYO GONZÁLEZ; MARCOS BÁRCENA, 2018).

Recentemente, as indústrias de manufatura começaram a adotar práticas de fabricação sustentáveis e uma Economia Circular em sua cadeia de suprimentos para mitigar as preocupações ambientais, pois práticas de fabricação sustentáveis em uma Economia Circular resultam na redução da geração de resíduos e no uso de energia e material (MOKTADIR *et al.*, 2018b).

Parida *et al.* (2019) propuseram um modelo para a implementação da Economia Circular em indústrias de larga escala que possui dois estágios. O primeiro estágio consiste em uma avaliação de prontidão do ecossistema que avalia os processos necessários para fazer a transição do ecossistema para o paradigma da Economia Circular. No segundo estágio, as empresas de manufatura se envolvem na transformação do ecossistema analisando os padrões, investimentos e negociações necessárias.

Diversos benefícios podem ser obtidos com a adoção de um modelo de negócio circular. Na indústria da construção civil, Nasir *et al.* (2017) mostraram que uma cadeia de suprimentos circular que utiliza materiais reciclados para produzir materiais de isolamento reduz as emissões totais de carbono durante o ciclo de vida produtivo, em comparação a uma cadeia de suprimentos linear que utiliza materiais virgens para produção.

Na indústria alimentícia, Laso *et al.* (2018) demonstram que a introdução de princípios de Economia Circular na gestão dos resíduos da anchova melhora a ecoeficiência da indústria de conservas. No entanto, são necessárias campanhas intensivas de conscientização do consumidor para que esses consumidores comprem produtos alimentícios mais eco eficientes, mesmo a custos mais altos.

A Economia Circular também exige a adoção de novos modelos de negócios e a criação de apoio adequado por meio de políticas, legislação ambiental e instrumentos econômicos e de mercado (ABREU; CEGLIA, 2018). Esses aspectos, juntamente com a falta de tecnologia e a falta de conhecimento e conscientização dos fornecedores, estão entre os principais desafios encontrados na implementação da Economia Circular (SHARMA *et al.*, 2019), enfatizando a necessidade de estímulos em todo o sistema agroalimentar (BORRELLO *et al.*, 2016).

Assim como no Brasil, a indústria alimentícia na Austrália desempenha um papel socioeconômico importante e, também, gera encargos ambientais. Ao identificar as ineficiências do ciclo de vida da produção de alimentos nesse país, Pagotto e Halog (2016) propuseram a implementação de um modelo para reduzir os impactos ambientais.

O modelo proposto por Pagotto e Halog (2016) recomenda a implementação de um gerenciamento de recursos sustentáveis e do gerenciamento integrado de resíduos e energia. Essas medidas propostas, se implementadas com eficiência, reduziram a dependência energética não renovável de vários subsetores da indústria de alimentos, especialmente os que envolvem processamento de alimentos.

Na indústria açucareira, Gopinath *et al.* (2018) destaca a existência de uma relação simbiótica entre as indústrias de açúcar, cimento e energia, em que o bagaço, o subproduto primário da indústria açucareira, é observado como um material versátil para uso como fonte de combustível, enquanto o subproduto secundário da indústria açucareira é uma matéria-prima útil para construção.

Uma relação simbiótica, ou simbiose industrial, é definida como uma forma de intermediação para reunir empresas em colaborações inovadoras a partir do compartilhamento de resíduos como fonte de matéria-prima (ALI; WANG; ALVARADO, 2019).

Para ilustrar os benefícios da simbiose industrial, Ali, Wang e Alvarado (2019) propuseram a reutilização de sucata de aço gerada na indústria automobilística para a fabricação de fachadas exteriores de edifícios. Os resultados mostraram que a reutilização da sucata levaria a uma redução de custos de aproximadamente 40% e economia de aproximadamente 67% de consumo de energia em relação a reciclagem convencional.

Além da troca de resíduos, as estratégias do sistema industrial devem ser expandidas, também, para aumentar a eficiência energética e reduzir, reutilizar, remanufaturar e reciclar resíduos (ABREU; CEGLIA, 2018). Com base nessas considerações, verifica-se há vantagens de passar de um sistema linear tradicional para um sistema de produção circular, onde uma Economia Circular sustentável e eficiente poderia ser criada na indústria de alimentos (PAGOTTO; HALOG, 2016).

A necessidade de implementação de iniciativas de circularidade e sustentabilidade na cadeia de suprimentos alimentícia também pode ser justificada porque a Economia Circular permite que as organizações ofereçam produtos seguros e de alta qualidade da maneira mais sustentável (SHARMA *et al.*, 2019). Contudo, aplicar a Economia Circular nesse contexto ainda exige esforços significativos (BORRELLO *et al.*, 2016).

Jurgilevich *et al.* (2016) sugerem algumas políticas e soluções para a transição da Economia Circular na produção de alimentos. Os órgãos governamentais devem apoiar o investimento, incentivos fiscais para a recuperação de nutrientes, o uso de nutrientes recuperados e reciclados e os produtores locais que possuem produção animal e vegetal e usam adubo para nutrientes ou suportam infraestruturas de maior escala, onde a reciclagem de nutrientes do adubo e do lixo para o campo é organizada maneira holística.

Na implementação, a fim de buscar o objetivo de uma economia de zero desperdício na cadeia de suprimentos agroalimentares, colaborações intersetoriais devem ser criadas para limitar o vazamento de matéria. Isso permitiria superar o problema decorrente da definição de limites do sistema. Ao conectar várias cadeias de valor todos os fluxos de materiais podem ser incorporados em um sistema circular global (BORRELLO *et al.*, 2016).

2.3 INDICADORES DE ECONOMIA CIRCULAR

A implementação dos princípios da Economia Circular (EC) é cada vez mais recomendada como uma solução conveniente para atender aos objetivos do desenvolvimento sustentável (NGAN *et al.*, 2019a; SAIDANI *et al.*, 2019).

No entanto, a difusão desse conceito na arena industrial ainda é relativamente lenta, principalmente nos países em desenvolvimento, que coletivamente exercem alto potencial para serem as maiores economias e força de trabalho do mundo (NGAN *et al.*, 2019b).

A transformação para uma Economia Circular é um processo complexo que exige planejamento e avaliação cuidadosos, o que requer a capacidade dos tomadores de decisão de obter melhores *insights* sobre processos organizacionais e soluções circulares que provavelmente contribuirão para a sustentabilidade. Os indicadores de desempenho devem ser vistos como portadores de informações úteis e mensuráveis para apoiar o processo de tomada de decisão em circunstâncias complexas (KRAVCHENKO; PIGOSSO; MCALOONE, 2019).

Os indicadores que descrevem a Economia Circular despertaram um interesse considerável em todo o mundo, mas ainda não foi alcançado um consenso sobre o que os indicadores de Economia Circular no nível do produto devem medir (NIERO; KALBAR, 2019)

e não existem muitas pesquisas conceituais e empíricas com foco no desenvolvimento de indicadores (BANAITĖ; TAMOŠIŪNIENĖ, 2016; ELIA; GNONI; TORNESE, 2017).

A Economia Circular representa uma estratégia de desenvolvimento que implica crescimento econômico sem aumentar o consumo de recursos, transforma profundamente as cadeias de produção e os hábitos de consumo e redesenha os sistemas industriais no nível do sistema, entretanto, não existe um método reconhecido para avaliar a eficácia com que o produto ou toda a empresa faz a transição de um modo linear de operação para um modelo circular, e não existem ferramentas adequadas para apoiar essas medições (SMOL; KULCZYCKA; AVDIUSHCHENKO, 2017).

Embora tenham sido feitas algumas tentativas de medir ou estimar os efeitos de sustentabilidade das estratégias de Economia Circular, elas geralmente implantam metodologias que se baseiam em informações de entrada multifacetadas (KRAVCHENKO; PIGOSSO; MCALOONE, 2019), cobrem aspectos diferentes e variados da transição da Economia Circular e aparentemente não têm relação entre si (PARCHOMENKO *et al.*, 2019), se mostrando ferramentas inadequadas acompanhar o progresso da transição da Economia Circular (AVDIUSHCHENKO; ZAJAÇ, 2019).

Quase todas as técnicas existentes avaliam o uso de recursos com base em sua carga em relação ao valor, enquanto o ponto central da Economia Circular é criar valor por meio da retenção de material. As técnicas orientadas a carga existentes são, portanto, inadequadas para orientar os gerentes em relação aos objetivos da Economia Circular (FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016).

Dessa forma, novas ferramentas são necessárias para apoiar profissionais, tomadores de decisão e formuladores de políticas em direção a mais práticas circulares, bem como monitorar os efeitos da adoção de uma Economia Circular (SAIDANI *et al.*, 2019).

Embora a medição do progresso em direção a uma Economia Circular possa ser um fator desafiador, vários indicadores podem ser usados para avaliar a evolução nessa direção. É por isso que a reciclagem em geral, bem como a reciclagem de resíduos urbanos, se tornou uma questão estratégica principal no processo de implementação dos princípios da Economia Circular (MORAGA *et al.*, 2019; TANTAU; MAASSEN; FRATILA, 2018).

As perspectivas de Economia Circular mais predominantes concentram-se no descarte de resíduos, uso primário *versus* secundário de recursos, eficiência de recursos / produtividade e eficiência de reciclagem. Apenas algumas métricas de EC avaliam elementos relacionados à manutenção do valor, como retenção, alteração de valor e longevidade, apesar de que um

objetivo central da Economia Circular frequentemente proclamado é manter o valor de produtos, peças e materiais por um período máximo de tempo (PARCHOMENKO *et al.*, 2019).

O Quadro 1 apresenta os indicadores mais recentes relacionados a Economia Circular.

Quadro 1 - Indicadores e métricas relacionados à Economia Circular.

Fonte	Indicador	Descrição
(PIRES; MARTINHO, 2019)	$WHI = \frac{[(1x(\text{Resíduos reutilizados} + \text{Reciclados} + \frac{\text{Compostagem}}{\text{Digestão}})) + ((-1x(\text{Incinerados} + \text{Aterrados})))]}{\text{Total resíduos tratados}}$	Calcula o nível de implementação da hierarquia de resíduos, considerando diferentes tipos de reciclagem e incineração, onde pesos diferentes são atribuídos, dependendo das maneiras pelas quais as operações de resíduos contribuem para a <i>EC</i> .
(MOLINA-SÁNCHEZ <i>et al.</i> , 2018)	$\text{Eficiência da EC para água} = \frac{\text{vol. água tratada com potencial de recuperação durante o tratamento}}{\text{vazão vol. total da água consumida no processo de produção.}}$	Esse indicador varia de 0 a 100%: 0 significa que nenhuma água foi recuperada durante o processo e 100% é o caso ideal de sustentabilidade, onde há tal recuperação de água durante o processo que não ocorre consumo externo.
(HUYSMAN <i>et al.</i> , 2017)	$CPI = \frac{\text{benefício atual}}{\text{benefício ideal de acordo com a qualidade}}$	O indicador de desempenho da Economia Circular (CPI) é definido como a razão entre o benefício ambiental real obtido e o benefício ambiental ideal de acordo com a qualidade. Uma boa Economia Circular tem um valor de CPI igual a um, significando que o processo de reciclagem atualmente aplicado tem uma perda e impacto material insignificante.
(TANTAU; MAASSEN; FRATILA, 2018)	$\text{Taxa de reciclagem} = \frac{\text{Resíduos municipais reciclados(ton)}}{\text{Total de resíduos reciclados(ton)}}$	A taxa de reciclagem dos resíduos urbanos é um dos principais indicadores de eficiência da reciclagem, representando um dos elementos para uma implementação eficiente da Economia Circular no processo de produção e consumo.
(LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017)	$c = \frac{\text{valor econômico das partes recirculadas}}{\text{valor econômico do todo}}$	A métrica de circularidade é dada pela razão entre o valor econômico recirculado e o valor total do produto, usando os custos da cadeia de valor como um estimador. Varia entre 0 e 1 (ou 0% a 100% de peças recirculadas).

Fonte	Indicador	Descrição
(KAYAL <i>et al.</i> , 2019)	$ICAR = Eficiência da Produção * Indicador de Reutilização * Indicador de Reciclagem$	O Índice de Circularidade de Águas Residuais (<i>ICAR</i>) mede a eficiência da produção, bem como a eficiência da reciclagem e reutilização de cada Estação de Tratamento de Efluentes.
(FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016)	$Longevidade = vida\ útil\ inicial + contribuição\ vitalícia\ de\ recodicionamento + contribuição\ vitalícia\ de\ reciclagem$	A longevidade do produto mede a contribuição para a retenção de material com base na quantidade de tempo que um recurso é mantido em uso.
(FIGGE <i>et al.</i> , 2018a)	$Circularidade = n^{\circ}\ de\ vezes\ que\ um\ recurso\ é\ usado\ num\ sistema\ produtivo$	A métrica de circularidade se estende aos recursos de que as empresas têm controle e como elas mantêm essas dentro do sistema do produto, ou seja, uso, reutilização (ou reforma) e reciclagem
EMC (2015)	$ICM_p = \max (0,1 - LFI \cdot F(X))$ <p>LFI = Proporção de material proveniente de materiais virgens que acabam em lixo irrecuperável; F(X)=função que mede quanto tempo e intensidade um produto é usado em comparação com um produto médio do mesmo tipo.</p>	O Indicador de Circularidade de Material (ICM_p) atribui uma pontuação entre 0 e 1 para um produto (ou empresa) avaliando quão restaurador ou linear é o fluxo dos materiais para o produto e por quanto tempo é usado em comparação com produtos similares à média da indústria.
MAIO; REM (2015)	$IEC = \frac{valor\ de\ mercado\ do\ material\ produzido\ pelo\ reciclador}{valor\ do\ material\ que\ entra\ na\ instalação\ de\ reciclagem}$	O Índice de Economia Circular (IEC) introduz o valor econômico dos materiais incorporados nos produtos de consumo como propriedade a ser mensurada e contabilizada.
(FOGARASSY <i>et al.</i> , 2017)	$VEC\% = 100 - \left(\frac{\left(\frac{M_p}{M_p + M_s} + \frac{M_d}{M_r + M_d} \right) + \left(\frac{E_f}{E_s + E_f} + \frac{E_l}{E_c + E_l} \right)}{4} \right) \cdot 100$	O Valor Econômico Circular (VEC) busca identificar os pontos de melhoria do uso de material (M) e energia (E) para aprimorar a circularidade.

Fonte	Indicador	Descrição
(AZEVEDO; GODINA; MATIAS, 2017)	$(I_{sust_circ_{is}})_j = W_s \sum (W_{is} \cdot NI_{is})$	$(I_{sust_circ_{is}})_j$ representa o Índice de Sustentabilidade Circular da companhia j. W_s representa o peso associado e W_{is} o peso do indicador i para a dimensão social, econômica, ambiental ou circular. O índice avalia o comportamento sustentável e circular de uma organização.
(CULLEN, 2017)	$IC = \frac{\text{Material Recuperado}}{\text{Demanda Total de Material}} \cdot \left(1 - \frac{\text{energia para recuperar o material}}{\text{energia para a produção primária}}\right)$	O Índice de Circularidade (IC) é uma estimativa da circularidade do material que leva em consideração as perdas tanto em quantidade quanto em qualidade ao reprocessar materiais.
(ZAMAN; LEHMANN, 2013)	$\text{Índice de Zero Desperdício} = \frac{\sum \text{Qtd. potencial de desperdícios} \cdot \text{Substituição pelos sistemas}}{\text{Qtd. total de desperdício gerado pela cidade}}$	O índice de desperdício zero é uma ferramenta para medir a potencialidade de materiais virgens serem compensados por sistemas de gerenciamento de desperdício zero.
(DI MAIO <i>et al.</i> , 2017)	$VRE = \frac{Y}{\sum_i W_i X_i}$	O indicador de eficiência de recursos baseada em valor (VRE) mede a eficiência e a circularidade alinhadas com o valor de mercado dos recursos X_i e seus preços W_i baseado no valor de saída Y . Pode ser usado para avaliar se um setor ou a economia total utiliza recursos de maneira eficiente.
(MAGNIER, 2017)	$\text{Taxa de uso cíclico de material} = \frac{\text{Qtd. de resíduos recuperados}}{\text{Qtd. de material demandado}}$	A taxa do uso cíclico de material representa o uso de matérias-primas recicladas nos processos de produção.

Fonte	Indicador	Descrição
(GARCÍA-BARRAGÁN; EYCKMANS; ROUSSEAU, 2019)	$C_t^* = R_t^* - L_t^*$	<p>A atividade circular da economia C_t^* é definida como a diferença entre a ótima atividade de reciclagem R_t^* e a ótima atividade linear L_t^*. Se o valor da expressão for positivo, diz-se que a economia é circular. Se negativo ou igual a zero, a economia é linear.</p>
(BARROS, 2019)	$\%Circ_p = \frac{(EI_n + SI_n)}{(EI_n + SI_n + EE_n + SE_n)} \cdot 100$	<p>O percentual de circularidade do processo $Circ_p$ mensura a Economia Circular em uma organização a nível de processo.</p>
(BARROS, 2019)	$\%Circ_o = \frac{\sum_1^n (Cp_j * Mp_j)}{\sum_1^n Mp_j}$	<p>O percentual de circularidade da organização $Circ_o$ mensura a Economia Circular em uma organização a nível global, onde Cp_j é o percentual de circularidade por processo, Mp_j é quantidade de energia ou massa de cada processo e n é o número de processos da organização.</p>

Fonte: adaptado de Saldani *et al.* (2019).

A maioria dos indicadores de Economia Circular não captura pressões ambientais relacionadas às atividades que abordam. Muitos se concentram em uma única atividade ou processo de EC, o que não contribui necessariamente para o aumento da sustentabilidade ambiental em geral (HELANDER *et al.*, 2019).

De modo geral, há uma necessidade urgente de métricas que quantifiquem a circularidade no nível do produto para avaliar criticamente e facilitar a transição para uma economia mais circular (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017).

As métricas de circularidade são úteis para avaliar empiricamente os efeitos de uma Economia Circular em termos de lucratividade, criação de empregos e impactos ambientais. Atualmente, no entanto, não existe um método padronizado para medir a circularidade dos produtos (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017).

Além da circularidade, a longevidade também é necessária para o uso sustentável dos recursos, desse modo, ambas abordagens devem ser combinadas (FIGGE *et al.*, 2018b). No desenvolvimento de métricas, deve-se levar em consideração que a melhoria no desempenho econômico e na aceitação do público são os principais gatilhos para incentivar as partes interessadas ao desenvolvimento sustentável (NGAN *et al.*, 2019b).

Em resumo, a maneira como os sistemas circulares são avaliados requer simplicidade, mas deve manter um nível mínimo adequado de detalhes em todos os domínios de valor, o que é essencial para permitir processos sólidos de tomada de decisão. Os critérios para definir um conjunto adequado de métricas para avaliar a recuperação de recursos a partir de resíduos exigem que sejam simples, transparentes e fáceis de medir, além de serem específicos ao sistema e às partes interessadas, permitindo uma análise eficaz e transparente da recuperação de recursos e resíduos de sistemas de Economia Circular (IACOVIDOU *et al.*, 2017).

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia é entendida como o modo de conduzir uma pesquisa e envolve todo o conhecimento geral e habilidades que são necessários para orientar o pesquisador na investigação (ALVES, 2013). Na Engenharia de Produção, existe uma diversidade de abordagens e métodos comumente adotados na pesquisa científica devido a ampla abrangência da área (MIGUEL, 2018).

A Engenharia de Produção envolve dez grandes áreas, sendo elas: engenharia de operações e processos da produção, logística, pesquisa operacional, engenharia da qualidade,

engenharia do produto, engenharia organizacional, engenharia econômica, engenharia do trabalho, engenharia da sustentabilidade e educação em engenharia de produção (ABEPRO, 2017).

A presente pesquisa se enquadra na área de engenharia da sustentabilidade, que, segundo a ABEPRO (2017), atua no planejamento da utilização eficiente dos recursos naturais, na destinação e tratamento dos resíduos e na implantação de sistemas de gestão ambientais nos sistemas produtivos diversos.

Contribuir para o desenvolvimento sustentável, uma das subáreas da engenharia de sustentabilidade, é o objeto de estudo da presente pesquisa, que foi desdobrado a partir da proposta de utilização da Economia Circular. Os procedimentos que permitiram o desenvolvimento desse estudo estão apresentados nessa seção.

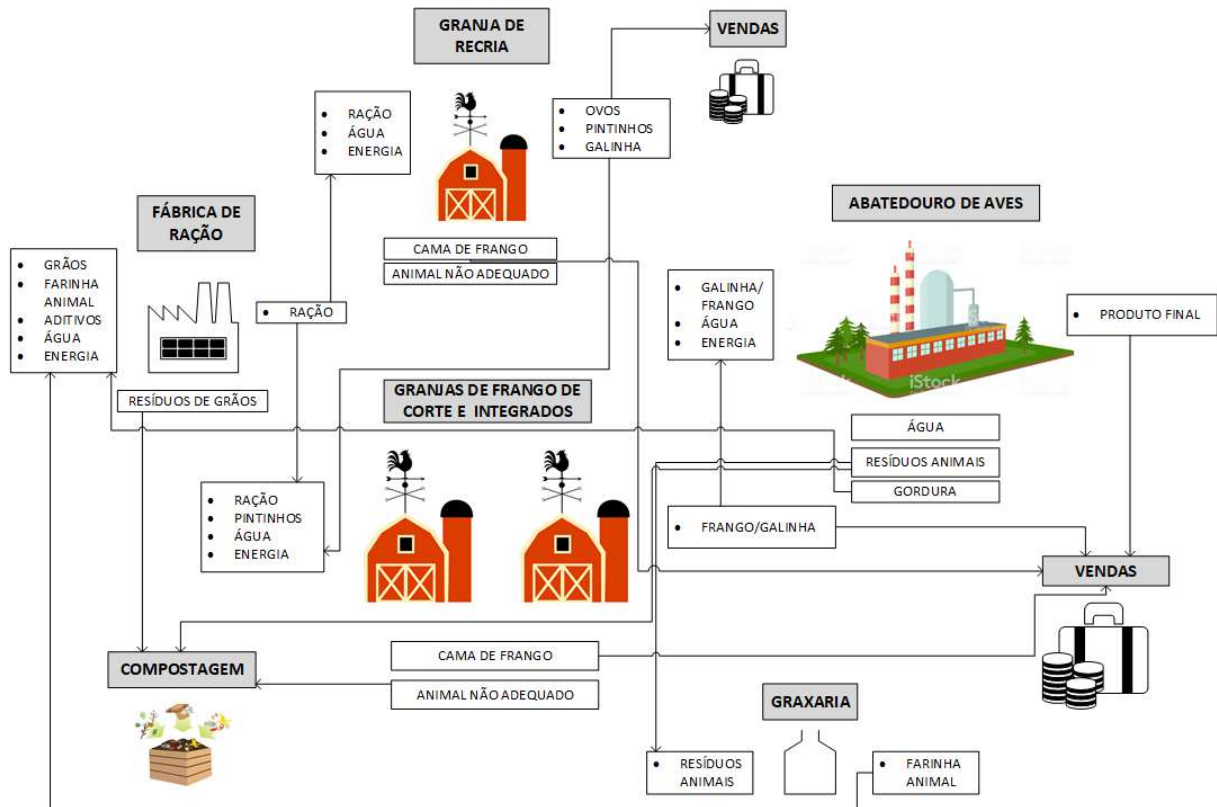
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

O presente trabalho busca identificar elementos para transformar o ciclo produtivo de uma indústria alimentícia circular e regenerativo, considerando as leis da termodinâmica. A indústria alimentícia estudada está localizada no Oeste da Bahia, inserida na região do MATOPIBA, que responde por grande parte da produção brasileira de grãos e fibras (EMBRAPA, 2019a).

A indústria alimentícia atua no segmento avícola, desde a produção de rações, incubação de pintos, produção de matrizes, criação de aves até abate e distribuição, possuindo alto grau de verticalização. A cadeia produtiva se inicia na produção de rações que alimentam as galinhas matrizes, responsáveis pela produção de ovos. Os ovos são incubados por 21 dias até o nascimento dos pintinhos, que são transportados às granjas de frango de corte para criação. Após 45 dias, em média, as aves são abatidas no abatedouro. Cerca de 70.000 aves são abatidas por dia. Em toda a cadeia, são empregados aproximadamente 1.100 colaboradores.

A Figura 3 ilustra a cadeia de suprimentos da indústria, formada por um grupo de empresas de mesma administração e de organizações externas, com respectivas entradas e saídas. A fábrica de rações recebe grãos e nutrientes de elos externos e farinha e gordura animal produzidos no abatedouro, que é um elo interno a cadeia. A ração produzida é transportada para as granjas, que produzem ovos, galinhas matrizes e frango de corte. Ao total, são duas granjas de frango de corte, uma de produção de ovos e pinto de 1 dia, mais granjas integradas à indústria.

Figura 1 - Cadeia de suprimentos da indústria alimentícia.



Fonte: elaborado pelo autor.

O produto final, cortes de carne de frango e seus derivados, é produzido no abatedouro e transportado aos centros de distribuição, clientes varejistas e exportado para países como China, Hong Kong e Haiti. O transporte entre centros de distribuição, fábrica, granjas e abatedouro é realizado pela frota própria do grupo.

Dentre os resíduos gerados nos processos ao longo da cadeia, tem-se os resíduos de limpeza dos grãos na fábrica de ração, que são destinados à compostagem. Nas granjas tem-se pintos de 1 dia e frangos inapropriados para corte, que são aterrados e destinados à compostagem. A partir da compostagem, é produzido o adubo orgânico, que é comercializado para clientes externos.

Nas granjas, tem-se, também, o resíduo da cama de frango, que é todo o material distribuído no aviários para servir de leito aos animais. É formado, inicialmente, por palha de café e, à medida que as aves são criadas, recebe excreções, restos de ração e penas (AVILA; MAZZUCO; FIGUEIREDO, 1992). Quando a cama de frango não é mais considerada adequada para a criação das aves, o material é comercializado como esterco.

No abatedouro, obtém-se como resíduos penas e vísceras das aves abatidas, que são destinados ao setor de graxaria, interno à cadeia, para obtenção de farinha de pena e vísceras,

gordura animal, que é destinada à produção de rações, sendo transportada para a fábrica e para clientes externos, água, que é destinada às estações de tratamento, e outros resíduos industriais de origem animal, que são destinados à compostagem. Na cadeia de suprimentos, em geral, são produzidos resíduos como óleo queimado, plástico, papelão, ferro, alumínio, aço inox e cobre, que são comprados por cooperativas de reciclagem.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

As tipologias de pesquisa são diversas e a classificação se constitui de obras de diversos autores (NASCIMENTO, 2016). Entretanto, a forma mais comum de classificar uma pesquisa científica utiliza uma taxonomia quanto à natureza (básica ou aplicada), quanto aos objetivos (exploratória, descritiva e explicativa), quanto a abordagem (qualitativa, quantitativa ou combinada) e quanto aos métodos (CAUCHICK-MIGUEL, 2018; GIL, 2019; DEB; DEY; BALAS, 2019).

Com relação a natureza, a pesquisa aplicada procura resolver um problema imediato que uma instituição, organização, grupo ou ator social enfrenta e gerar impacto ao obter e confirmar resultados, enquanto a pesquisa básica se preocupa com generalizações e formulação de uma teoria, sem interesse aplicado imediato (DEB; DEY; BALAS, 2019).

A partir dos objetivos, as pesquisas podem ser classificadas em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas. Uma pesquisa exploratória constrói hipóteses ou explicita um problema e se preocupa com a atuação prática, assim como a pesquisa descritiva, que busca definir relações entre variáveis ou descrever um fenômeno ou população. Ambos os tipos de pesquisa podem ser aprofundados com uma pesquisa explicativa, que busca identificar fatores associados a fenômenos através da experimentação (GIL, 2019).

Quanto à abordagem, uma pesquisa pode ser quantitativa, qualitativa ou combinada (CAUCHICK-MIGUEL, 2018). A pesquisa quantitativa pode ser definida como uma pesquisa que explica fenômenos de acordo com dados numéricos que são analisados por meio de métodos baseados em matemática, especialmente estatística (YILMAZ, 2013).

A pesquisa qualitativa é caracterizada por lidar com experiências humanas, que são subjetivas, e por construir o conhecimento durante o estudo (BENJUMEA, 2015). Permite ao pesquisador explorar e entender melhor a complexidade de um fenômeno e pode ser considerada mais complexa que a quantitativa, visto que trata da mente e das ações humanas (MOHAJAN, 2018).

As evidências quantitativas e qualitativas podem ser combinadas em uma síntese de método misto para auxiliar no entendimento de como a complexidade afeta as intervenções em contextos específicos (NOYES *et al.*, 2019). A abordagem combinada pode prover evidências mais abrangentes, pois traz a possibilidade de usar todos os métodos e técnicas de coleta de dados disponíveis, em vez de ficar restrito aos de cada abordagem (CAUCHICK-MIGUEL, 2018).

Diante do exposto, esta pesquisa pode ser classificada, em relação à natureza, como aplicada, pois visa fornecer informações acerca da aplicação da Economia Circular em uma indústria de transformação e, por definição, a pesquisa aplicada se inicia com base na necessidade de informações em resposta a uma situação, problema ou oportunidade em particular (BAIMYRZAEVA, 2018).

Quanto aos objetivos, a presente pesquisa se classifica como exploratória, pois busca familiarizar um problema pouco abordado na literatura, que é o caso desse trabalho, tornando-o mais explícito e envolve um levantamento bibliográfico sobre a temática e entrevistas com pessoas que tiveram experiências com o problema pesquisado (GIL, 2019).

O presente estudo também se caracteriza como uma pesquisa descritiva, pois procura relacionar duas variáveis, os indicadores de consumo energético e circularidade, e descrever como a Economia Circular pode ser ativada numa organização (NASSAJI, 2015).

Em relação a abordagem, a pesquisa se classifica como combinada, pois utiliza tanto a abordagem qualitativa quanto quantitativa de modo sequencial, em que a primeira abordagem é usada para facilitar o desenho da segunda (HAMMARBERG; KIRKMAN; LACEY, 2016). Em um primeiro momento, é realizado um estudo qualitativo para compreender o fluxo do sistema produtivo e a cadeia de suprimentos em que está inserida a organização, posteriormente, um estudo quantitativo sobre o consumo energético dos processos produtivos. Com base em ambos resultados, são identificadas as oportunidades para ativar a Economia Circular.

Além da classificação quanto a natureza, objetivos e abordagem, o presente trabalho pode ser classificado de acordo com os procedimentos técnicos ou métodos utilizados nas pesquisas da engenharia de produção, apresentados no Quadro 2 conforme (CAUCHICK-MIGUEL, 2018).

Quadro 2 - Métodos de Pesquisa adotados na Engenharia de Produção

Métodos de Pesquisa adotados na Engenharia de Produção	
Levantamento tipo <i>survey</i>	Busca extrair conclusões acerca de uma amostra significativa de um problema a ser investigado. Utilizado, principalmente, quando se deseja obter um panorama descritivo de um fenômeno ou testar teorias.
Estudo de caso	Investiga um fenômeno dentro de situações práticas atuais por meio de análise aprofundada de um ou mais objetos de análise.
Modelagem	Utiliza técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo.
Simulação	Utiliza técnicas computacionais para simular o funcionamento de sistemas produtivos a partir de modelos matemáticos
Estudo de campo	Utiliza dados de campo sem estruturação formal do método de pesquisa.
Experimento	Verifica a relação entre variáveis de um sistema sob condições controladas.
Teórico-conceitual	São revisões bibliográficas e modelagens conceituais a partir da literatura.
Pesquisa-ação	Pesquisa social orientada à ação com uma base empírica concebida da resolução de um problema coletivo e no qual pesquisadores e representantes do problema estão envolvidos de modo cooperativo.

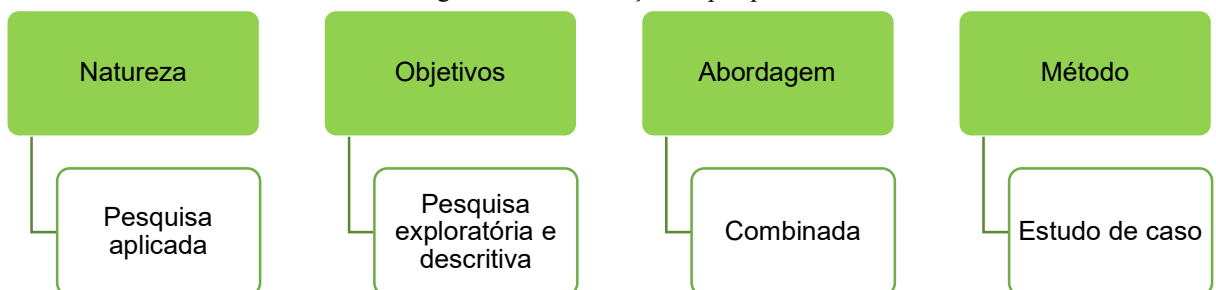
Fonte: Adaptado de Cauchick-Miguel (2018).

De acordo com o método científico utilizado, o presente trabalho se classifica como estudo de caso, pois investiga como a Economia Circular, o fenômeno, pode ser utilizada dentro de uma Indústria Alimentícia, o objeto de análise.

Os estudos de caso contribuem, de forma inigualável, para a compreensão dos fenômenos individuais, organizacionais, sociais e políticos e outros eventos complexos da vida real (YIN, 2018).

De modo resumido, o presente trabalho apresenta uma pesquisa aplicada, de abordagem combinada, caráter exploratório e descritivo e método científico de estudo de caso, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 2 - Classificação da pesquisa.

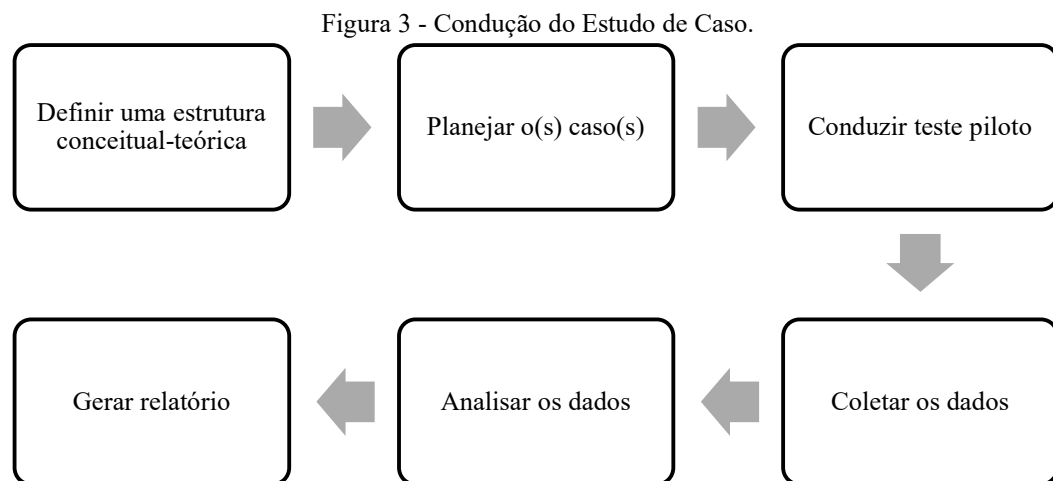


Fonte: elaborador pelo autor.

3.3 PROCEDIMENTOS

O estudo de caso é um dos métodos mais utilizados no desenvolvimento de pesquisas (CAUCHICK-MIGUEL, 2018). Pode ser apresentado com uma abordagem combinada e aplicado na investigação de diversos fenômenos, sejam eles individuais, grupais, organizacionais, políticos e sociais, permitindo ao pesquisador focar em um caso num contexto real (SILVA; MERCÊS, 2018).

O planejamento e a execução do estudo de caso exigem rigor para o atendimento dos objetivos de uma pesquisa, é necessária uma estrutura (DRESCH; LACERDA; CAUCHICK-MIGUEL, 2015). Uma proposta de conteúdo e sequência para a realização de um estudo de caso pode ser vista na Figura 2.



Fonte: Cauchick-Miguel (2018).

As etapas propostas por Cauchick-Miguel (2018) iniciam-se com o mapeamento da literatura para identificação de lacunas em que a pesquisa possa ser justificada. No planejamento do caso, determinam-se as unidades de análise e os procedimentos para coleta e análise de dados. Após o teste piloto, os dados são coletados e analisados para gerar um relatório que desenhe as implicações teóricas.

A presente pesquisa foi conduzida a partir da metodologia proposta por Cauchick-Miguel (2007). Na primeira etapa, foi realizado um mapeamento da literatura sobre o tema Economia Circular nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *ScienceDirect*, escolhidas por serem as mais relevantes atualmente.

O mapeamento da literatura ocorreu entre maio a outubro de 2019. A busca dos trabalhos foi desenvolvida utilizando operadores Booleanos e truncamento. Limitou-se os

trabalhos entre os anos de 2014 a 2019 em todas as bases de dados pesquisadas a fim de se obter artigos atualizados. O campo de busca utilizado foi o título dos artigos.

Na execução da pesquisa, apenas artigos completos e artigos de revisão foram selecionados, ambos disponíveis na língua inglesa e publicados em periódicos internacionais. Para cada termo utilizado na busca, três filtros foram aplicados. O primeiro consistiu na exclusão dos trabalhos duplicados. O segundo foi aplicado pela leitura dos títulos. Aqueles que não se relacionavam com o tema foram excluídos. Por fim, no terceiro filtro foram selecionados artigos em que os resumos apresentavam relação com o tema.

Os termos utilizados na busca, a quantidade de documentos em cada base de dados, e o resultado após a aplicação de cada filtro estão relacionados no Quadro 3.

Quadro 3 - Relação dos artigos utilizados como referência para a pesquisa.

Termo de busca: <i>(circular economy OR circularity) AND (indicator OR metric OR index)</i>					
Base de dados	Resultados	Total	Após filtro 1	Após filtro 2	Após filtro 3
Web Of Science	28	103	55	43	33
Science Direct	31				
Scopus	44				
Termo de busca: <i>(circular economy OR circularity) AND (industry)</i>					
Base de dados	Resultados	Total	Após filtro 1	Após filtro 2	Após filtro 3
Web Of Science	51	135	78	63	16
Science Direct	25				
Scopus	59				
Termo de busca: <i>(circular economy) AND (limit OR barriers OR benefit)</i>					
Base de dados	Resultados	Total	Após filtro 1	Após filtro 2	Após filtro 3
Web Of Science	20	64	50	45	36
Science Direct	19				
Scopus	25				
Termo de busca: <i>(circular economy) AND (thermodynamic)</i>					
Base de dados	Resultados	Total	Após filtro 1	Após filtro 2	Após filtro 3
Web Of Science	3	33	21	10	4
Science Direct	11				
Scopus	19				
Termo de busca: <i>(circular economy) AND (food)</i>					
Base de dados	Resultados	Total	Após filtro 1	Após filtro 2	Após filtro 3
Web Of Science	21	45	25	18	5
Science Direct	7				
Scopus	17				

Fonte: elaborado pelo autor.

Portanto, a composição final dos trabalhos para o mapeamento de literatura consistiu em 79 trabalhos. Na segunda etapa, a organização de análise foi selecionada. Para conhecer os processos gerais da organização, uma entrevista semiestruturada, conforme apresentado no Apêndice A, foi utilizada. Não foi necessário a realização de um teste piloto. Posteriormente, na quarta etapa, dados dos fluxos de entrada e saída de massa e energia relacionados às atividades da indústria foram coletados para mensuração dos indicadores.

Os dados coletados na organização foram medidos em massa (kg), energia elétrica (kWh), volume (L) e unidade. Diante disso, houve a necessidade de transformar os dados coletados em unidade e volume para massa e equivalente em energia elétrica, de modo a gerar comparação de resultados para a mesma unidade de medida. Para transformar unidade em massa, utilizou-se a massa média de alguns, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de referência para materiais e energia.

Material	Valor Base	Referência
Ovo de galinha	0,060 kg/Unidade	Carvalho (1968), Traldi <i>et al.</i> (2009), Fiuza (2014), Silva <i>et al.</i> (2015) e Nascimento <i>et al.</i> (2015).
Pinto de 1 dia	0,042 kg/Unidade	Bertechini (1997)

Fonte: elaborado pelo autor.

A organização forneceu os valores da produção de pintos de 1 dia e de ovos em termos de unidade decimal e a quantidade de combustível em volume. Dessa forma, houve a necessidade de transformação para unidade de massa e volume para energia. Para transformar volume em unidade de energia elétrica, utilizou-se a equivalência energética entre diversas fontes de energia, mostrado na Tabela 2

Tabela 2 - Equivalência energética entre diversas fontes de energia.

Energético	Ferraz e Marriel (1980)	Barrera (2011)
Biogás (m ³)	1,000	1,00
Gasolina (L)	0,613	0,61
Óleo Diesel (L)	0,553	0,55
Lenha (kg)	-	1,54
Energia Elétrica (kWh)	1,428	1,43

Fonte: Ferraz e Marriel (1980) e Barrera (2011).

Considerando que a indústria avícola é uma produtora global de dióxido de carbono (CO₂), para estimar a quantidade de massa de gás poluente emitido pela empresa estudada,

adotou-se que para cada 2 kg de frango, 3 kg de CO₂ são gerados em todo o ciclo produtivo, conforme apresentado por Henn (2013).

A coleta de dados foi baseada nos processos envolvidos na cadeia de suprimentos em que está inserida a organização. As informações de entradas e saídas foram coletadas no período de janeiro a outubro de 2019, junto à organização.

Na quinta etapa da condução do estudo de caso, a circularidade com base nos dados dos fluxos da organização foi calculada a partir do índice proposto por Barros (2019). A análise dos fluxos e seu impacto na circularidade permitiu a identificação dos fluxos de massa e energia que poderiam ativar a Economia Circular.

Por fim, na sexta etapa, baseado nos resultados obtidos, um modelo de Economia Circular foi proposto para que a organização aumentasse sua circularidade. Além disso, a partir de uma análise das limitações termodinâmicas da circularidade, um novo indicador para a Economia Circular foi proposto.

A segunda lei da termodinâmica, juntamente com o princípio de conservação de massa em um sistema e o trabalho de Gutowski et al. (2013), que analisou a potencial economia de energia ao se utilizar massa reaproveitada em um processo produtivo, apoiaram a definição do novo indicador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do trabalho contemplam um modelo para promover a Economia Circular em cadeias de suprimento avícolas. Os resultados e discussões foram segregados em três vertentes, como segue. A seção 4.1 mostra os resultados quanto aos indicadores quantitativos de circularidade dos processos envolvidos na cadeia com base em medidas existentes na literatura. A segunda vertente, seção 4.2, destaca o potencial de elementos ativadores da Economia Circular. A terceira seção apresenta a proposta de um indicador de Economia Circular que considera globalmente os aspectos de massa e energia envolvidos nos processos, bem como restrições de natureza Termodinâmica.

4.1 INDICADORES QUANTITATIVOS DE CIRCULARIDADE

Para identificar os elementos que podem ativar a Economia Circular nas organizações da indústria alimentícia, a circularidade foi mensurada com base no indicador proposto por Barros (2019), apresentado no Quadro 1. A medida proposta por Barros (2019), seja a nível de processo ou organizacional, representa o quão circular é o sistema em termos de material ou energia.

Para medir a circularidade de cada unidade da indústria alimentícia estudada foi utilizada a Equação (1), proposta por Barros (2019), conforme apresentado no Quadro 1.

$$\%Circ_p = \frac{(EI_n + SI_n)}{(EI_n + SI_n + EE_n + SE_n)} \cdot 100 \quad (1)$$

onde

$Circ_p$: Percentual de circularidade por processo;

EI_n : Fluxo de entrada proveniente de um processo interno da organização;

SI_n : Fluxo de saída direcionado para um processo interno da organização;

EE_n : Fluxo de entrada proveniente de um processo externo da organização;

SE_n : Fluxo de saída direcionado para um processo externo da organização;

n : Número de níveis estipulado (n : 1, 2, 3, ...).

Para medir a circularidade da cadeia de suprimentos da indústria alimentícia a nível global foi utilizada a Equação (2), também proposta por Barros (2019), conforme apresentado no Quadro 1.

$$\%Circ_o = \frac{\sum_1^n (Cp_j * Mp_j)}{\sum_1^n Mp_j} \quad (2)$$

onde

$Circ_o$: Percentual de circularidade da organização;

Cp_j : Percentual de circularidade por processo;

Mp_j : Quantidade de massa ou energia de cada processo;

n : Número de processos da organização.

Os cálculos foram realizados com base nos dados coletados e baseados no nível macro de análise, em que cada unidade da indústria alimentícia avícola representa um processo e a rede de empresas que forma a indústria é definida como a organização. Inicialmente, foi calculada a circularidade de cada unidade da indústria. Posteriormente, obteve-se a circularidade para a cadeia de suprimentos. A Tabela 3 apresenta a circularidade mensurada, em termos de material, com base na média dos dados obtidos a cada mês.

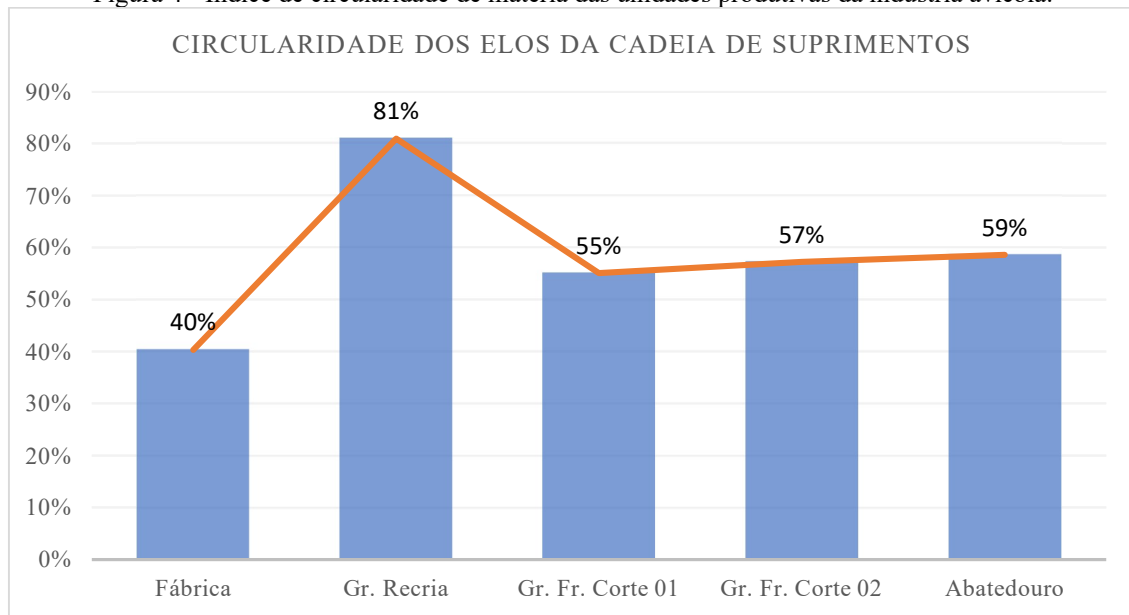
Tabela 3 - Circularidade para processos e organização em termos de material.

Processo	Origem/ /Destino	Entradas (kg)	Saídas (kg)	Total de Matéria (kg)	Circularidade por processo	Circularidade da cadeia
Fábrica de	Interna	295.560,80	8.376.259,03	21707732,96	40%	
Ração	Externa	10.402.566,96	2.633.346,17			
Granja de	Interna	1.792.457,83	117.384,17	2443504,285	78%	
Reprodução	Externa	1.090,37	532.571,92			
Granja de	Interna	3.266.686,34	1.561.862,10	9316826,59	52%	49%
Fr. Corte 01	Externa	193.660,00	4.294.618,15			
Granja de	Interna	3.379.022,63	1.425.031,80	9153883,328	52%	
Fr. Corte 02	Externa	98.002,00	4.251.826,90			
Abatedouro	Interna	3.612.718,10	318.765,44	6627545,89	59%	
	Externa	66.118,00	2.629.944,35			

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 3 apresenta os índices de circularidade obtidos com base na medida proposta por Barros (2019). O índice de circularidade da cadeia de suprimentos da indústria avícola foi de 49%, isso significa que menos da metade dos materiais que adentram na cadeia, permanece recirculando dentro dos limites. A Figura 4 ilustra, graficamente, a circularidade média dos elos da cadeia de suprimentos da indústria avícola.

Figura 4 - Índice de circularidade de matéria das unidades produtivas da indústria avícola.



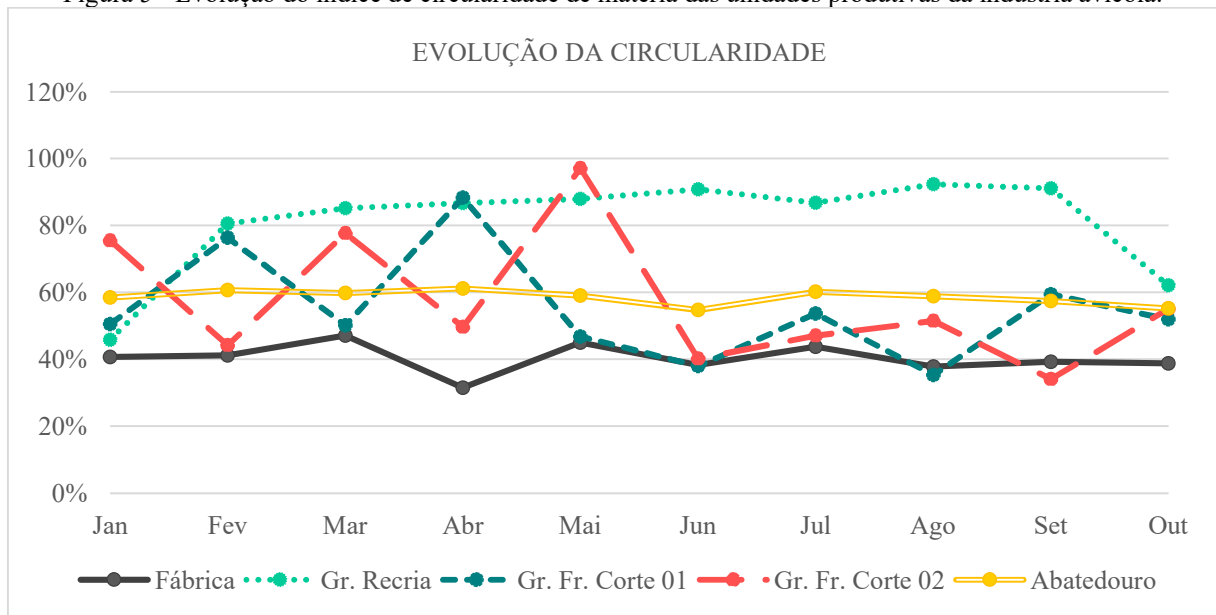
Fonte: elaborado pelo autor.

É possível perceber que a granja de recria apresentou a maior circularidade, em que apenas 19% dos materiais são originados externamente e destinados ao exterior da cadeia. As granjas de criação de frango de corte apresentaram índices de circularidade semelhantes o que significa que, apesar de se tratarem de plantas industriais diferentes, são muito semelhantes nas atividades e quantidade de material trocado.

Para as granjas e abatedouro, tem-se índices de circularidade acima de 50%, que são motivados pelo elevado grau de verticalização da indústria, em que a atividade principal é o abate e o processamento de aves, e as demais atividades da cadeia, como produção de ovos e incubação pela granja de recria e criação dos frangos são realizadas por outros negócios da empresa, de forma verticalizada.

Temporalmente, com base nos dados obtidos de janeiro a outubro de 2019, é possível observar a evolução do índice de circularidade para os elos da cadeia produtiva na Figura 5.

Figura 5 - Evolução do índice de circularidade de matéria das unidades produtivas da indústria avícola.



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar que a fábrica de rações e o abatedouro apresentaram pouca variabilidade da circularidade ao longo do tempo, com desvio padrão de 4% e 2%, respectivamente. Isso significa que as trocas de materiais são semelhantes ao longo do tempo, gerando um elevado nível de agregação de valor (BARROS, 2019).

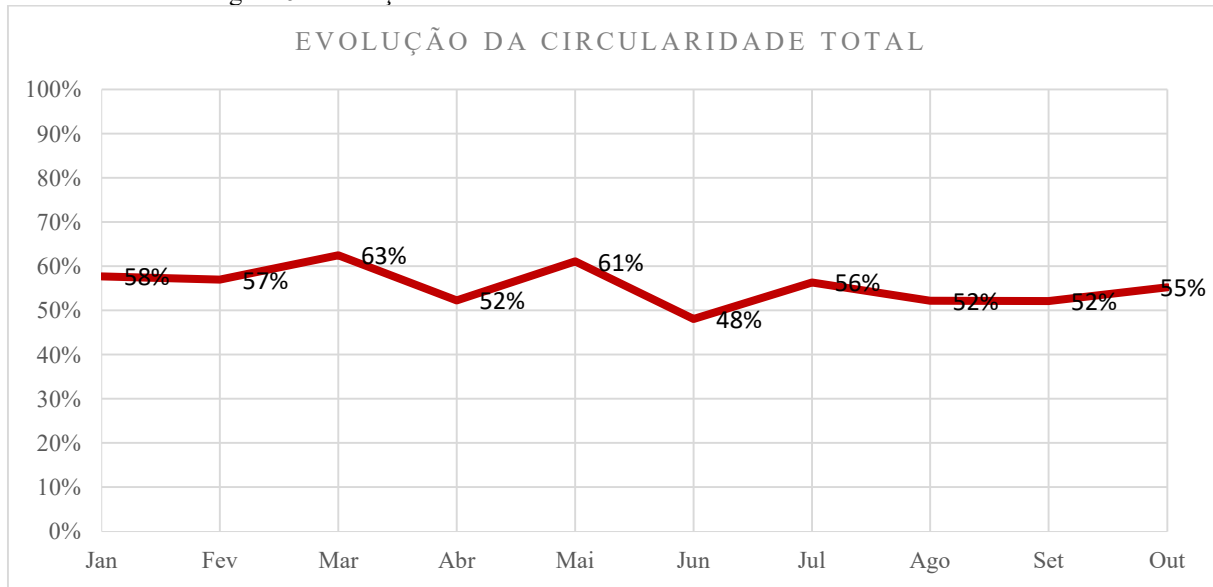
Para as granjas de frango de corte, a circularidade teve um menor índice nos meses em que houve venda da cama de frango como esterco para clientes externos à cadeia. Nos meses em que não houve venda de cama de frango e a quantidade de frango de corte enviada para abate foi baixa comparada com a média, o índice de circularidade apresentou os maiores índices.

Na granja de frango de corte 01, os picos de circularidade ocorreram nos meses de fevereiro e abril, quando a venda de cama de frango foi nula e a quantidade de frango de corte vendido e enviado para abate foi 98% e 84% menor que a média, respectivamente. Na granja de frango de corte 02, os maiores índices de circularidade foram obtidos nos meses de março e maio, em que a quantidade de frango de corte vendido e enviado para abate e a quantidade de cama de frango retirada também foi baixa em relação à média.

Para a granja de recria, onde ocorre a produção de ovos e incubação, o índice de circularidade foi consideravelmente inferior nos meses em que houve retirada de esterco, janeiro e outubro, se comparado aos outros meses. Esses resultados indicam que a retenção do esterco na cadeia de suprimentos pode vir a aumentar o índice de Economia Circular na indústria.

Em relação a evolução da circularidade total da cadeia produtiva, a Figura 6 mostra os valores do índice para os meses de janeiro a outubro de 2019. Em geral, o índice se manteve estável com variabilidade de 4%, medida pelo desvio padrão.

Figura 6 - Evolução do índice de circularidade material da indústria avícola.



Fonte: elaborado pelo autor.

O menor valor de circularidade foi registrado no mês de junho, quando todas as unidades produtivas registraram baixos valores de entradas e saídas em comparação aos outros meses. No mês de junho, a venda de esterco foi superior a 6 mil toneladas, 271% maior que a média, que é de aproximadamente 2,4 mil toneladas.

Portanto, uma oportunidade de ativar a Economia Circular, em termos de massa, é a retenção da cama de frango, comercializada como esterco pela indústria. A retenção da cama de frango é uma alternativa para o gerenciamento de recursos e pode contribuir com o desenvolvimento sustentável, como destacado por Bocken *et al.* (2016) e Mavi e Mavi (2019).

A retenção da cama de frango na cadeia produtiva é uma técnica que criaria valor por meio da retenção de material, que é o ponto central da Economia Circular segundo Franklin-Johnson, Figge e Canning (2016), e contribuiria para o objetivo do modelo circular de economia ao manter o valor de um produto por um período máximo de tempo, conforme pontuado por Parchomenko *et al.* (2019).

Em termos energéticos, o valor médio de circularidade da indústria alimentícia, segundo a definição de Barros (2019), pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Circularidade para processos e organização em termos de energia.

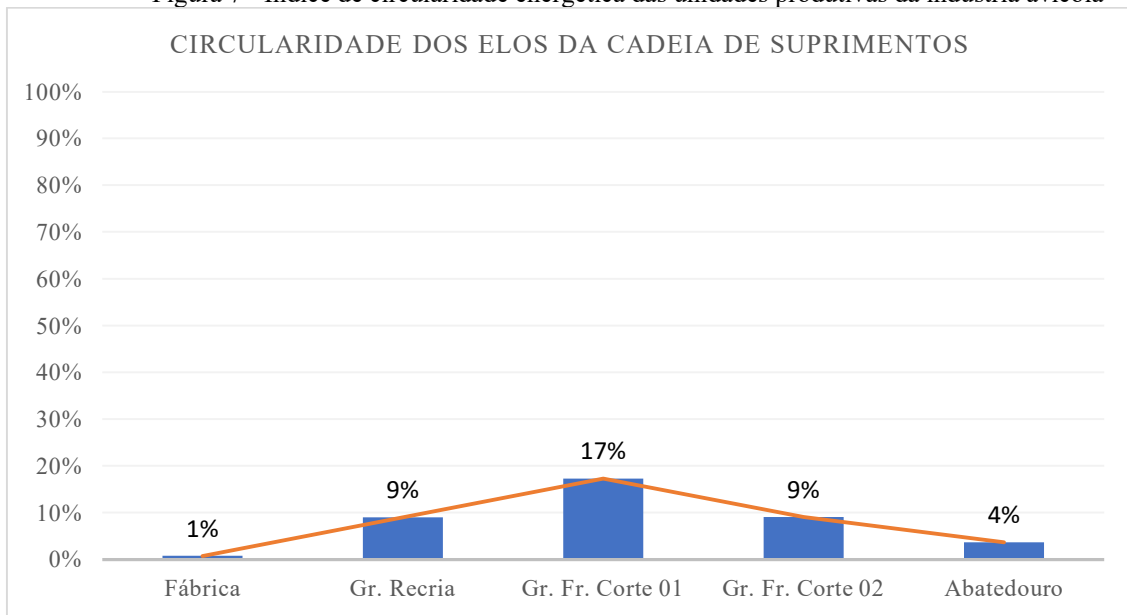
Processo	Origem/ /Destino	Entradas (kWh)	Saídas (kWh)	Total de Energia (kWh)	Circularidade por processo	Circularidade da cadeia
Fábrica de	Interna	3.878,55	0,00	503.302,45	1%	
Ração	Externa	499.423,90	0,00			
Granja de	Interna	27.726,97	0,00	306.903,14	9%	
Reprodução	Externa	279.176,17	0,00			
Granja de	Interna	16.424,25	0,00	219.015,11	7%	4%
Fr. Corte 01	Externa	202.590,86	0,00			
Granja de	Interna	20.387,47	0,00	232.034,83	9%	
Fr. Corte 02	Externa	211.647,36	0,00			
Abatedouro	Interna	46.234,53	0,00	1.294.071,57	4%	
	Externa	1.247.837,04	0,00			

Fonte: elaborado pelo autor.

A rede local fornece energia elétrica para todas as unidades produtivas, sendo que o abatedouro exige o maior consumo de energia com um valor superior a 1 milhão de kWh por mês, pois exige que frigoríficos fiquem ligados ininterruptamente, visto que produz alimentos perecíveis e que necessitam de baixas temperaturas no armazenamento.

É possível verificar que, em termos energéticos, a circularidade de cadeia produtiva da indústria alimentícia é baixa, sendo, em média, 4%, o que significa que 96% de toda a energia elétrica utilizada provém de fontes externas, visto que não há produção de energia com saída interna entre os processos. O gráfico apresentado na Figura 7, que mostra os índices médios de circularidade ao longo do tempo para as unidades produtivas analisadas, confirma a alta dependência de fontes externas da indústria.

Figura 7 - Índice de circularidade energética das unidades produtivas da indústria avícola

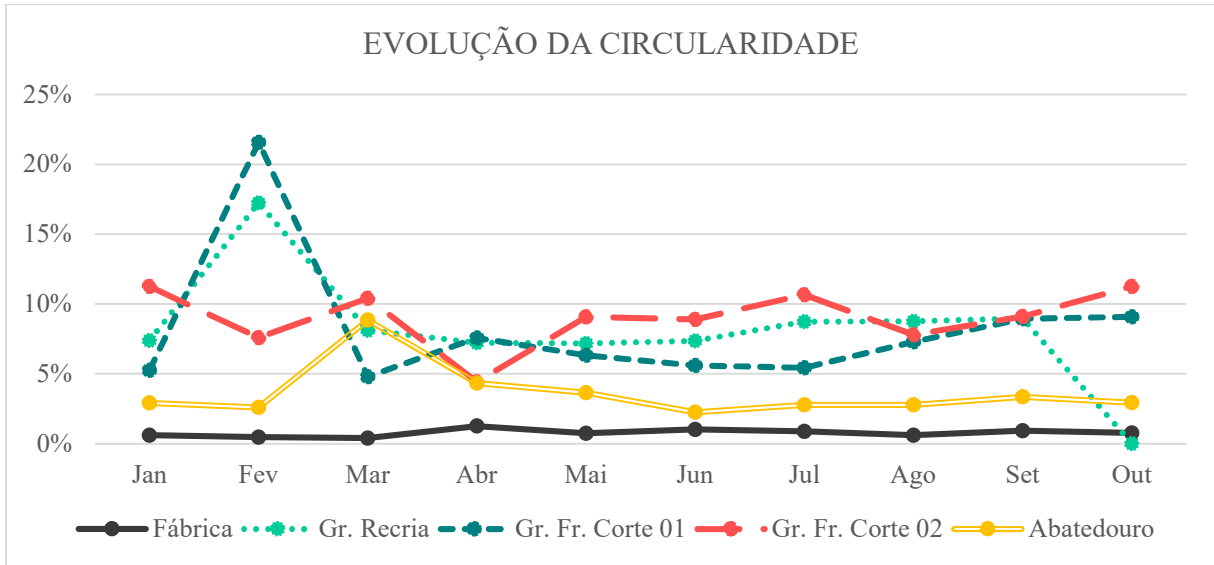


Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados demonstram que a indústria é altamente dependente da rede de eletricidade local, utilizando uma fonte própria, o motor gerador, quando há quedas de energia ou em horários de pico, em que o valor do kWh fornecido pela rede local é mais elevado em relação aos outros momentos do dia.

Também é possível verificar que os menores valores de circularidade energética são registrados nos elos da ponta da cadeia, sendo que os elos intermediários apresentam os maiores índices, assim como na análise de circularidade de matéria. Esse resultado pode ser confirmado no gráfico da Figura 8 que mostra a evolução dos índices de circularidade energética ao longo dos meses de janeiro a outubro de 2019.

Figura 8 - Evolução do índice de circularidade energética das unidades produtivas da indústria avícola.



Percebe-se que, ao longo do tempo, as granjas de produção de ovos e incubação e de frango de corte apresentaram os maiores índices de circularidade energética, exceto no mês de março, em que o abatedouro apresentou um elevado índice, se comparado aos outros meses. Nesse mês, o abatedouro utilizou uma quantidade 18% menor de eletricidade advinda da rede externa e aumentou em 112% a utilização da energia advinda do motor gerador, se comparado à média dos outros meses.

No geral, a circularidade total teve baixa variabilidade ao longo do tempo, se desviando da média em 1%. A fábrica de rações apresentou os menores valores de circularidade energética, pois utiliza baixa quantidade de energia do motor gerador, já que não tem turno de trabalho no horário do pico de energia da rede elétrica.

Além dos baixos índices de Economia Circular em termos energéticos, a alta dependência de eletricidade advinda de uma fonte externa pode provocar prejuízos. Segundo a Confederação Nacional das Indústrias – CNI, cerca de “67% das empresas que utilizam a eletricidade como principal fonte em seu processo produtivo são impactadas de forma significativa em razão das interrupções no serviço” (CNI, 2016).

Alhelou *et al.* (2019) acrescenta que apesar da maioria das indústrias terem geradores de emergência, elas podem vir a perder horas de produção e, conseqüentemente, perder receita por não atender demandas ou metas em casos de interrupção do fornecimento de energia elétrica da rede.

Uma alternativa para evitar prejuízos decorrentes das falhas de fornecimento de energia elétrica pela rede externa é adotar fontes próprias e renováveis de energia, que, além de eliminar as instabilidades, reduziria o custo de compra da eletricidade e emissões de poluentes e contribuiria para a ativação da Economia Circular, tornando a indústria mais sustentável, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, conforme destacado por Bocken *et al.* (2016) e Mavi e Mavi (2019).

4.2 OPORTUNIDADES DE ATIVAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR

Com base nos indicadores quantitativos de circularidade, é possível identificar elementos em potencial para ativar a Economia Circular na indústria avícola, ou seja, os materiais ou fluxos de energia que são adquiridos ou vendidos para o exterior da cadeia produtiva e apresentam oportunidades de internalização, contribuindo para a vantagem competitiva e autossuficiência da indústria (BARROS, 2019).

Em termos de material, as oportunidades para tornar a cadeia produtiva circular se concentram nos fluxos de entrada e saída para o externo. No geral, a cadeia produtiva tem como entrada de material, proveniente do externo, grãos, vitaminas e minerais e combustível. Nesse sentido, a Economia Circular poderia ser ativada se esses materiais tivessem origem na cadeia de suprimentos da indústria, sendo internalizados. Um alternativa seria criar elos de sinergia entre a indústria e os fornecedores de matéria-prima de modo que haja uma cooperação ativa em busca de uma rede bem sucedida (CARDOSO DE OLIVEIRA *et al.*, 2019) em que, por exemplo, os resíduos orgânicos com potencial de adubação gerados pela cadeia produtiva da indústria fossem trocados pelas matérias-primas, como grãos, advindas de lavouras, que exigem o enriquecimento do solo.

Em relação aos materiais que são gerados ou produzidos na cadeia produtiva da indústria e possuem destino a clientes externos, tem-se que o principal produto destinado a externalidade é a ração, seguida da carne de frango e seus derivados. O terceiro maior fluxo de material representa a venda da cama de frango como esterco para clientes externos a cadeia de suprimentos. O esterco representa o maior fluxo de resíduo destinado a externalidade, em média, 2,4 mil toneladas por mês. A gordura de frango gerada pelo abatedouro é o segundo maior fluxo de resíduo destinada ao externo, cerca de 66 toneladas por mês. O adubo orgânico, óleo queimado e materiais recicláveis representam os outros fluxos de resíduos destinados ao externo.

Uma estratégia para aumentar a circularidade em relação aos materiais destinados ao externo é atuar no preciso gerenciamento dos resíduos e adotar fontes renováveis de recursos, conforme apontado por Bocken *et al.* (2016) e Mavi e Mavi (2019). Para tal, uma alternativa seria a retenção da cama de frango e da gordura animal na cadeia produtiva como fontes de recursos para os processos.

Diversos estudos apontam que a cama de frango é um material que pode ser utilizado tanto para a geração de energia quanto como fertilizante para o solo (METZNER *et al.*, 2015, BALDIN, 2013, MONTAGNA, 2017), podendo mitigar o impacto ambiental da avicultura, desde que seja realizado um adequado planejamento e capacitação do pessoal na criação das aves e no manejo dos seus resíduos (STAUB; SOUZA; TON, 2017).

Na cadeia produtiva da indústria avícola, a cama de frango é comercializada para propriedades rurais, gerando receita. Entretanto, com a comercialização, o manejo deste resíduo para a ser realizado pelo cliente, impossibilitando a indústria de diminuir os impactos que este material pode vir a causar.

Na Economia Circular, o objetivo é reduzir, reutilizar e reciclar os materiais nos processos produtivos, fechando laços de energia e material, conforme exposto por Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) e Prieto-Sandoval, Jaca e Ormazabal (2018). Portanto, para aumentar a circularidade, a indústria avícola deve reutilizar a cama de frango como fonte de recurso para seus processos, de modo que o impacto ao meio ambiente seja mínimo.

Deste modo, a cama de frango poderia ser utilizada para a geração de energia. A partir da biodigestão da cama de frango, é possível produzir biogás, que pode ser utilizado no aquecimento dos aviários através da queima e conseqüentemente produção de calor e pode substituir a energia elétrica na iluminação, por exemplo. O biogás tem alto coeficiente energético e fácil estocagem e transporte, tornando-se uma fonte de energia renovável adequada e que contribui para a sustentabilidade (PALHARES, 2004).

Na cadeia produtiva da indústria avícola, são gerados pelas três granjas, em média, 2,4 mil toneladas de cama de frango por mês. Os dados médios para cada uma das granjas podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Média de consumo de energia elétrica e retirada de cama de frango.

	Consumo (kWh/mês)	Produção de Cama de Frango (kg/mês)
Granja de recria	306.903,14	321.558,00
Granja de fr. corte 01	219.015,11	1.039.706,00
Granja de fr. corte 02	232.034,83	1.043.232,70

Fonte: elaborado pelo autor.

A energia em potencial que pode ser produzida pela cama de frango retirada das granjas será calculada considerando que o material tem uma umidade média de 31,49% e podem ser produzidos 0,2295 m³ de biogás para cada kg de matéria seca da cama de frango, conforme dados de Palhares (2004). Os resultados, com base na equivalência energética do biogás mostrada na Tabela 1, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Potencial produção de biogás e energia elétrica a partir da utilização da cama de frango.

	Granja de recria	Granja de fr. corte 01	Granja de fr. corte 02
Matéria natural da Cama de Frango (kg/mês)	321.558,00	1.039.706,00	1.043.232,70
Matéria seca (MS) da Cama de Frango (kg/mês)	220.299,39	712.302,58	714718,72
Produção de biogás (m³/kg MS) no mês	50.558,71	163.473,44	164.027,95
Equivalente em energia elétrica (kWh)	72.298,95	233.767,02	234.559,96
Consumo (kWh/mês)	306.903,14	219.015,11	232.034,83

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir desses resultados, é possível verificar que, para as granjas de frango de corte, em que a retirada de cama de frango é superior a granja de recria, o valor equivalente em energia elétrica que pode ser gerada a partir do biogás produzido com a matéria orgânica é superior a energia consumida fornecida pela rede local de eletricidade. Ou seja, caso as granjas de frango de corte reutilizem o material da cama de frango para produção de biogás, ela pode se tornar autossuficiente em energia, fechando os laços de material e energia e ativando a Economia Circular, conforme proposto por Prieto-Sandoval, Jaca e Ormazabal (2018).

Para a produção do biogás, Tessaro *et al.* (2015) mostrou que o processo mais eficiente é a biodigestão anaeróbica, em que são gerados efluentes resultantes da degradação da matéria orgânica, que podem ser utilizados ou comercializados como ricos fertilizantes naturais (ARAÚJO, 2017).

Para verificar a viabilidade econômica da proposta de produção de biogás nas granjas de frango de corte, temos que cada quilograma de cama de frango é comercializado por R\$ 0,18, em média, segundo dados fornecidos pela empresa, que custeia o transporte. O valor pago a companhia de eletricidade é variável no mês. A comparação das receitas e despesas relacionadas a essas atividades estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Despesas e receitas envolvidas na venda de cama de frango e consumo de energia elétrica.

	Granja de fr. corte 01	Granja de fr. corte 02
Custo com Energia Elétrica	R\$ 103.037,59	R\$ 76.951,44
Receita da venda da cama de frango	R\$ 187.147,08	R\$ 187.781,89
Custo do Transporte	R\$ 49.337,00	R\$ 49.504,00
Saldo	R\$ 34.772,49	R\$ 61.326,45

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nos dados financeiros médios, verifica-se que deixar de comercializar a cama de frango para produzir a própria energia elétrica não é viável financeiramente, pois o custo com energia elétrica comprada da rede local é menor do que a receita advinda da comercialização da cama de frango. Ou seja, a indústria, mesmo que comprando energia elétrica, lucra financeiramente.

Esse resultado é advindo de uma análise muito simplificada das receitas e despesas envolvidas, pois, para uma análise completa, precisam ser considerados os créditos de carbono que podem ser recebidos, o investimento no biodigestor e a receita advinda da venda do biofertilizante. Entretanto, o resultado simplificado é um indício de que uma barreira à implementação da Economia Circular é o fator financeiro.

O fator financeiro já foi citado como uma barreira à implementação da Economia Circular por diversos autores (GARCÉS-AYERBE *et al.*, 2019; MASI *et al.*, 2018). Hart *et al.* (2019) afirma que questões financeiras de mercado aliadas as dificuldades de demonstrar um forte argumento comercial para modelos circulares são os obstáculos reais a uma economia mais circular. Por esse motivo, para implementação da Economia Circular é necessário o desenvolvimento de políticas governamentais voltadas para sistemas econômicos regenerativos e o desenvolvimento de uma consciência ambiental na organização.

Apesar da barreira financeira, a adoção de um modelo de Economia Circular pode proporcionar uma redução na emissão de gases de efeito estufa. Com base nos dados de consumo de combustível utilizado pelos veículos da frota de esterco, em que são utilizados cerca de 14 mil litros de óleo diesel por mês segundo a indústria, estima-se que 44.800 kgCO₂ são gerados mensalmente, considerando que cada litro de óleo diesel emite, no mínimo, 3,20 kgCO₂ (CARVALHO, 2011).

Além disso, a produção intensiva de frangos de corte é uma atividade potencialmente poluidora. Estima-se que 24 kgCO₂ são gerados para cada quilograma de frango de corte produzido (LIMA; NÄÄS; GARCIA, 2017). Deste modo, a utilização da cama de frango para

a produção de energia elétrica contribuiria para a redução da poluição, já que a emissão de gases a partir do transporte de material até o cliente seria mitigado.

Na granja de recria, em que a quantidade de cama de frango comercializada é baixa e a produção de energia elétrica não seria viável, pode-se manter uma relação de sinergia entre as propriedades rurais, em que a granja fornece cama de frango para adubagem do solo em troca de benefícios na compra de grãos como matéria-prima para a fábrica de rações. Além da cama de frango, o biofertilizante produzido na biodigestão anaeróbica nas granjas de frango de corte também poderia ser fornecido às propriedades em troca de benefícios.

Outro material que pode aumentar a circularidade da cadeia produtiva se for retido na cadeia produtiva é a gordura animal. Além da produção de ração animal, a gordura de frango pode ser utilizada para a produção de sabão ou para a produção de biocombustível, conforme apontado por Centenaro, Furlan e Souza-soares (2008). Desse modo, a indústria avícola pode criar relações de simbiose com indústrias de biocombustíveis, trocando resíduos, a gordura de frango, por combustível, matéria-prima essencial para suas operações.

Diversos estudos mostraram como a gordura de frango pode ser utilizada para produzir o biodiesel (ZANETTI, 2012; TOMIELLO, 2014; BORTOLETO *et al.*, 2017). No geral, a reciclagem da gordura de frango se mostrou uma alternativa viável para a produção de biodiesel, sendo uma oportunidade de aumentar o valor agregado para a gordura de frango e os índices de rendimento de frango, com alta taxa de conversão entre 73,0% e 95,6% (MOREIRA, 2009; ZANETTI, 2012).

Atualmente, a indústria avícola destina ao exterior, em média, 66 toneladas de gordura de frango a um valor médio de R\$ 0,96/kg e utiliza, em média, 93 mil litros de biodiesel por mês. Com essa quantidade de gordura de frango, é possível produzir até 63 toneladas de biodiesel com base nas taxas de conversão, considerando uma massa específica de 874 kg/m³ (BORTOLETO *et al.*, 2017), essa quantidade é equivalente a 74 mil litros de biodiesel. Isso significa que a gordura de frango destinada ao externo tem potencial de atender a 80% da demanda de biodiesel.

O biodiesel é um biocombustível e representa uma fonte renovável de energia. Quando adicionado em combustíveis fósseis, auxilia na redução das emissões de CO₂. Deste modo, a reciclagem da gordura de frango como matéria-prima para a produção de combustível é vantajosa do ponto de vista ambiental e econômico, pois aumenta a oferta de matéria-prima, reduzindo os custos da produção de biodiesel (EMBRAPA, 2019b).

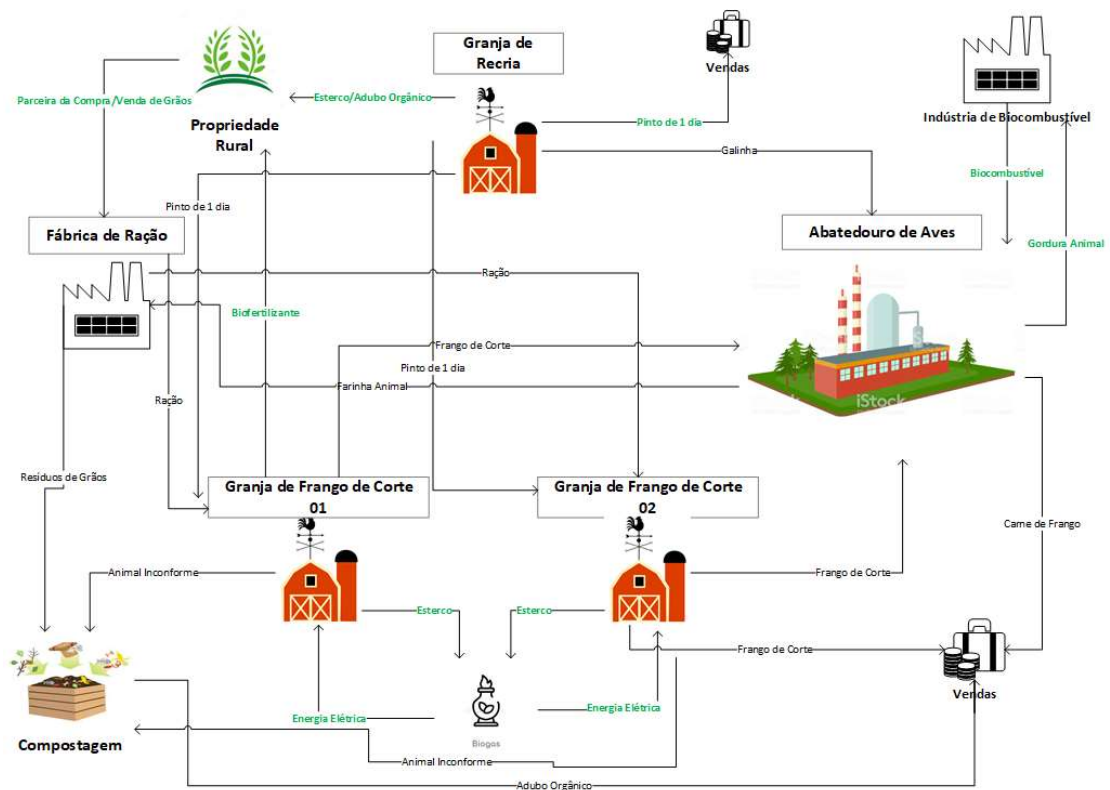
A reciclagem da gordura de frango pela indústria avícola promoveria a Economia Circular, com potencial de redução das emissões totais de carbono durante o ciclo de vida

produtivo, conforme mencionado por Nasir *et al.* (2017). Além disso, a indústria poderia se beneficiar dos créditos de carbono e construir uma imagem sustentável perante a sociedade.

Além das saídas com fluxo a externalidade relacionadas a produção da cadeia produtiva, a totalidade das sucatas recicláveis de papelão, plástico, ferro, alumínio, óleo queimado, aço inox e cobre isolado é comercializada para uma cooperativa de reciclagem da região. Esse é um fator que contribui para a ativação da Economia Circular na indústria, em que, além da geração de renda, se mantém uma relação de simbiose industrial.

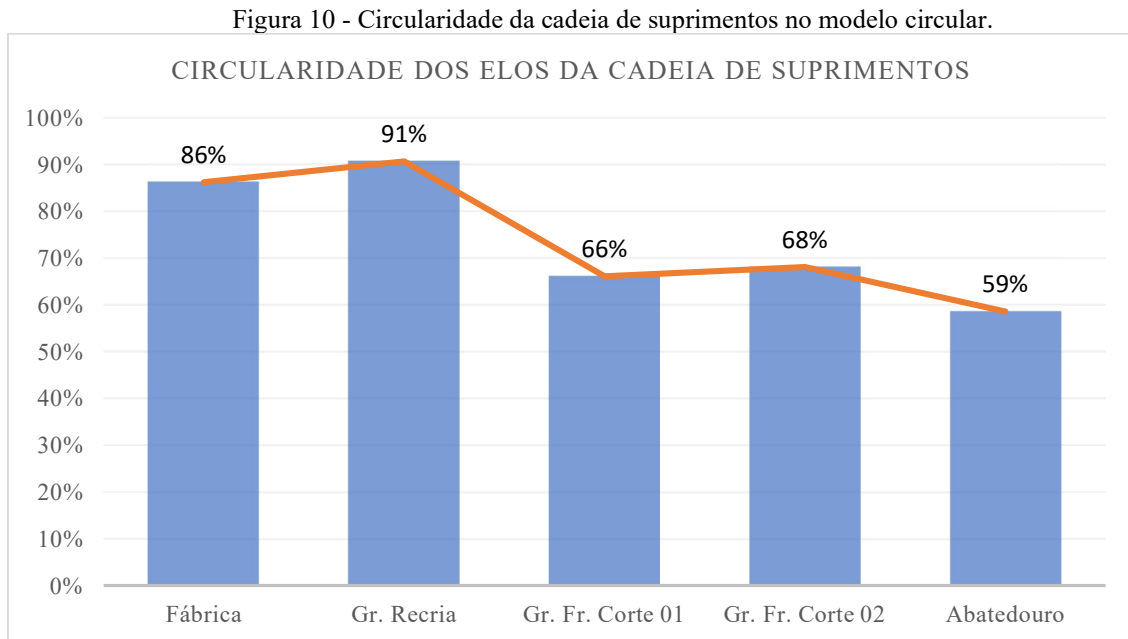
Em resumo, o modelo de Economia Circular na indústria avícola baseia na relação sinérgica entre a cooperativa de reciclagem de materiais, em que a indústria fornece os resíduos recicláveis para a cooperativa, e entre as propriedades rurais fornecedoras de grãos, em que seria fornecido a cama de frango e biofertilizante em troca de benefícios na compra da matéria-prima. Além disso, a cama de frango comercializada como esterco pelas granjas de frango de corte seria utilizada para produção de biogás, tornando as unidades autossuficientes em energia elétrica, e a gordura de frango produzida pelo abatedouro poderia ser fornecida à uma empresa de produção de biodiesel, de modo que a indústria avícola obtivesse benefícios na compra do combustível. A Figura 9 ilustra esse modelo de Economia Circular para a indústria avícola.

Figura 9 - Modelo de Economia Circular para a indústria avícola.



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir das propostas de implementação da Economia Circular na indústria, é possível verificar o potencial aumento de circularidade da cadeia. Em termos de material, a Figura 10 apresenta um gráfico que mostra a circularidade da cadeia na indústria avícola adotando o modelo de Economia Circular.



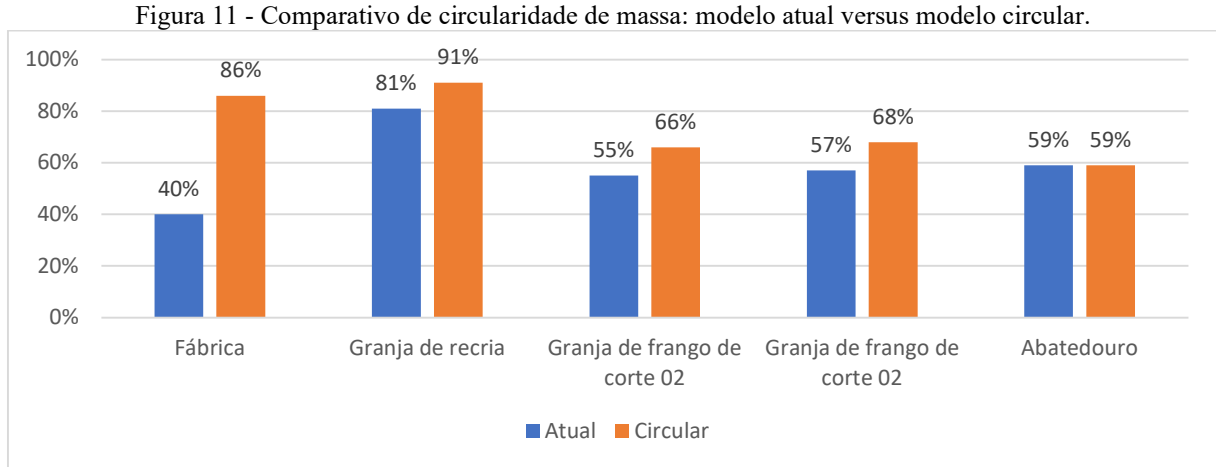
Fonte: elaborado pelo autor.

É possível observar o aumento de circularidade é significativo para a fábrica de rações, que teve uma circularidade de 40% aumentada para 85% devido às relações sinérgicas propostas. Para as granjas de frango de corte, a circularidade aumentou em 11% e para a granja de recria, a circularidade subiu para 91%, um valor superior em 10% em relação ao modelo econômico tradicional da indústria avícola.

No abatedouro, não houve aumento de circularidade, apesar das relações sinérgicas, visto que a quantidade de massa que pode ser recirculada é muito menor que a quantidade de venda de produtos finais. Isso se deve ao fato de que a saída de produtos para os clientes externos não é um fator de circularidade, conforme a definição de Barros (2019). Isso significa que quanto maiores forem as vendas da indústria, a circularidade é menor. Do ponto de vista financeiro, essa é uma desvantagem da definição de circularidade de Barros (2019).

A circularidade total da cadeia aumentou de 49% para 74%. Esse resultado mostra que o modelo de Economia Circular proposto não é 100% circular, pois não atua nas vendas externas da empresa, buscando manter o padrão de receitas. O comparativo dos índices de

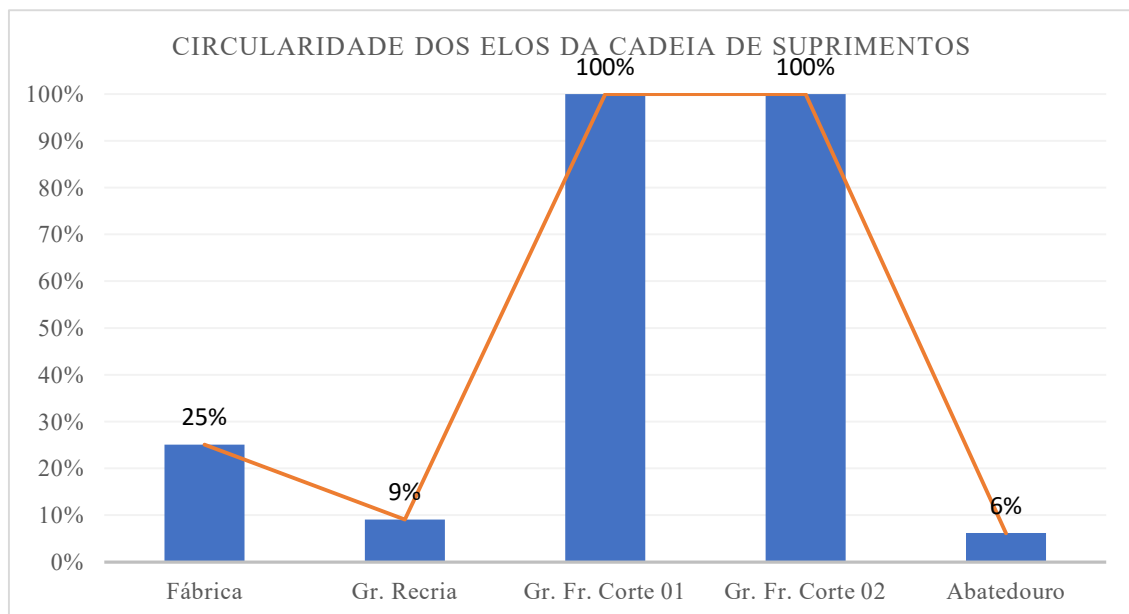
circularidades de massa atuais e a partir do modelo de Economia Circular pode ser visto na Figura 11.



Fonte: elaborado pelo autor.

Em termos de energia, a circularidade total da cadeia variou de 4% para 27%. O gráfico da Figura 12 mostra a circularidade energética dos processos da cadeia da indústria avícola.

Figura 12 - Circularidade energética para a cadeia de suprimentos no modelo circular.

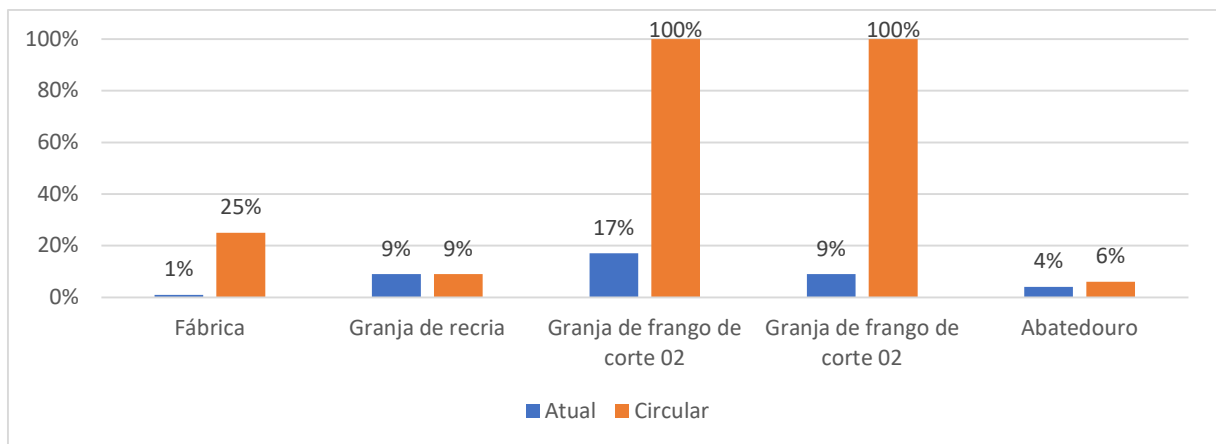


Fonte: elaborado pelo autor.

Em termos energéticos, o modelo de Economia Circular proposto altera a circularidade de granjas de frango de corte para 100%. Isso significa que as granjas de frango de corte têm potencial de ser autossuficientes em energia elétrica. Para as outras unidades produtivas, exceto

a fábrica de rações, não houve alteração significativa da circularidade, pois, com base nas atividades atuais da indústria, não há alternativas para internalizar o fluxo de energia. O aumento da circularidade na fábrica de rações e do abatedouro se deu pela relação de sinergia entre uma produtora de biocombustível e a indústria avícola. O comparativo dos índices de circularidades de energia atuais e a partir do modelo de Economia Circular pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Comparativo de circularidade de energia: modelo atual versus modelo circular.



Fonte: elaborado pelo autor.

No geral, o modelo proposto buscou desenvolver um modelo de Economia Circular com base nas atividades e fluxos de material e energia já existentes na indústria avícola, mostrando alternativas circulares para a cadeia de suprimentos e buscando conservar as receitas advindas da venda dos produtos finais.

4.3 ANÁLISE TERMODINÂMICA DA CIRCULARIDADE

A medida de circularidade utilizada para identificar elementos e fluxos que podem ativar o modelo econômico circular na indústria avícola foi proposta por Barros (2019) com o objetivo de mensurar a Economia Circular em uma organização em termos de massa e material e auxiliar o gerenciamento dos fluxos internos e externos. Entretanto, essa medida apresenta limitações em alguns aspectos importantes para a prática da Economia Circular.

A medida “não mensura outras abordagens ambientais e econômicas que podem estar contidas na Economia Circular” (BARROS, 2019, p.30), como salientado pelo próprio autor. Do ponto de vista financeiro, a Economia Circular, com base na definição da medida, não é

vantajosa, pois para que a circularidade seja 100%, é necessário que não haja fluxos externos à empresa, ou seja, não haja vendas de produto final, impedindo a empresa de obter receitas.

Outra limitação do índice de circularidade diz respeito ao cálculo distinto das circularidades de massa e energia. Nos resultados obtidos, é possível observar que as granjas de frango de corte, por exemplo, têm potencial de autossuficiência em energia com 100% de circularidade, porém, mais de 30% por cento dos fluxos de materiais não tem potencial de serem reaproveitados ou reciclados.

A granja de recria pode apresentar 91% de circularidade de massa, o que significaria que apenas 9% dos materiais não seriam recirculados na unidade produtiva, entretanto, verifica-se uma baixa circularidade energética. A proposta de indicadores de circularidade que separa energia e massa pode provocar confusão na análise dos fluxos, pois tem-se a informação de níveis de circularidade distintos para um mesmo setor, prejudicando a implementação da Economia Circular.

Essa limitação mostra que o índice de circularidade não é adequado para analisar os fluxos de massa e energia em conjunto, apesar de ambos os conceitos possuírem relação de equivalência. Portanto, uma medida adequada para a Economia Circular em uma organização deve integrar massa e energia, de modo que seja possível realizar uma análise de todos os fluxos. Diante disso, surge a necessidade de um indicador de circularidade que leve em consideração os fluxos de massa e energia da cadeia, bem como as limitações impostas pelas leis da Termodinâmica. Os tópicos 4.3.1 a 4.3.3 detalham a proposta do novo indicador.

4.3.1 Considerações de massa e energia

Para que seja produzido um total de massa Q_T na cadeia de suprimentos é necessário que seja utilizada uma quantidade total de energia E_T empregada em todos os processos realizados por cada elemento da cadeia. Quando a cadeia reutiliza parte da massa que é processada no decorrer da produção, o quantitativo total de massa utilizada na cadeia pode ser expresso, de acordo com o balanço de massa, como

$$Q_T = Q_s + Q_p \quad (3)$$

onde Q_s é a produção secundária definida como a parte da massa reutilizada e Q_p é a parte da massa que entra na cadeia vinda de fornecedores externos, chamada de produção primária.

De acordo com Gutowski (2008) e Gutowski *et al.* (2013), a energia empregada na produção da massa secundária reaproveitada ou reciclada é menor que a energia empregada para o processamento de massa primária e está diretamente associada a uma redução de custos e aumento de circularidade nos processos. Matematicamente, a energia total empregada por uma cadeia de suprimentos que processa massa obtida de forma primária e secundária pode ser escrita como (GUTOWSKI *et al.*, 2013):

$$E_T = Q_p e_p + Q_s e_s \quad (4)$$

onde e_s e e_p são as intensidades de energia secundária e primária, respectivamente.

Para estimar os valores das intensidades de energia primária e secundária de uma cadeia de suprimentos que reaproveita e recicla materiais, é necessário calcular, inicialmente, a intensidade de energia média \bar{e} dada por

$$\bar{e} = \frac{E_T}{Q_T} \quad (5)$$

Conhecendo os valores de Q_s e Q_p utilizado pela cadeia, pode-se estimar o gasto energético excedente E_{exc} caso a parte de massa secundária Q_s fosse obtida de forma primária, assim

$$E_{exc} = \bar{e} Q_s = \frac{Q_s}{Q_T} E_T \quad (6)$$

onde pode-se definir a fração r de material secundário como

$$r = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (7)$$

e reescrever a Equação (6) da seguinte maneira

$$E_{exc} = r E_T \quad (8).$$

Deste modo, o gasto energético excedente da cadeia caso sejam utilizados apenas produtos primários, pode ser escrito como

$$\begin{aligned} E_T + E_{exc} &= e_p Q_T \\ E_T(1 + r) &= e_p Q_T \end{aligned} \quad (9)$$

em que a intensidade de energia primária é definida como

$$e_p = \bar{e}(1 + r) \quad (10)$$

Para calcular a intensidade de energia secundária e_s , as Equações 3, 4, 5 e 10 podem ser rearranjadas, obtendo

$$e_s = \bar{e}r \quad (11)$$

4.3.2 Restrições termodinâmicas de eficiência da circularidade

Com base nas considerações de massa e energia realizadas no tópico 4.3.1, pode-se dizer que $r = Q_s/Q_T$ fornece um bom indicativo de circularidade que relaciona os quantitativos de massa secundária e total de uma cadeia de suprimentos, da forma

$$\begin{cases} r = 0 \Rightarrow Q_s = 0, & \text{(Nenhum reaproveitamento de massa)} \\ r = 1 \Rightarrow Q_s = Q_T, & \text{(Total reaproveitamento de massa)} \end{cases} \quad (12)$$

A situação $Q_s = Q_T$ é irreal por dois problemas. Primeiro, não é interesse de uma cadeia reaproveitar totalmente o quantitativo de massa produzido, pois parte da massa é necessariamente produzida para ser comercializada e sair da cadeia. Além disso, existem limitações impostas pela segunda lei da termodinâmica no processo de recuperação de produtos (GUTOWSKI, 2008) de modo que apenas uma fração do quantitativo de Q_T pode ser reaproveitada.

Para que o ferramental termodinâmico possa ser utilizado de forma completa, é necessário estabelecer um indicador que leve em consideração conjuntamente os aspectos de massa e de energia envolvidos nos processos de reutilização e reciclagem de material. Com base no trabalho de Gutowski *et al.* (2013), que analisou a possibilidade de redução da intensidade de energia empregada na produção de materiais a partir de fontes secundárias, pode-se estabelecer esse indicador partindo da Equação (4) de acordo com a conservação de massa expressa na Equação (13).

$$Q_T = Q_p + Q_s \quad (13)$$

Deste modo, a energia total utilizada na cadeia de suprimentos pode ser escrita como

$$E_T = Q_T e_p (1 - m) \quad (14)$$

onde o parâmetro m é definido por

$$m = r \left(1 - \frac{e_s}{e_p} \right) \quad (15)$$

pode ser utilizado como um indicador de circularidade que considera aspectos de massa e energia envolvidos nos processos da cadeia de suprimentos.

Gutowski *et al.* (2013) afirma que a meta para redução dos gastos energéticos totais E_T é tornar o parâmetro m o mais próximo de 1, conforme pode ser visto na Equação (14). Entretanto, pode-se demonstrar, por considerações simples, que o maior valor possível para o indicador m é $1/2$. Considerando as estimativas de e_s e e_p obtidas anteriormente

$$\begin{cases} e_s = \bar{e}r \\ e_p = \bar{e}(1+r) \end{cases} \quad (16)$$

temos que

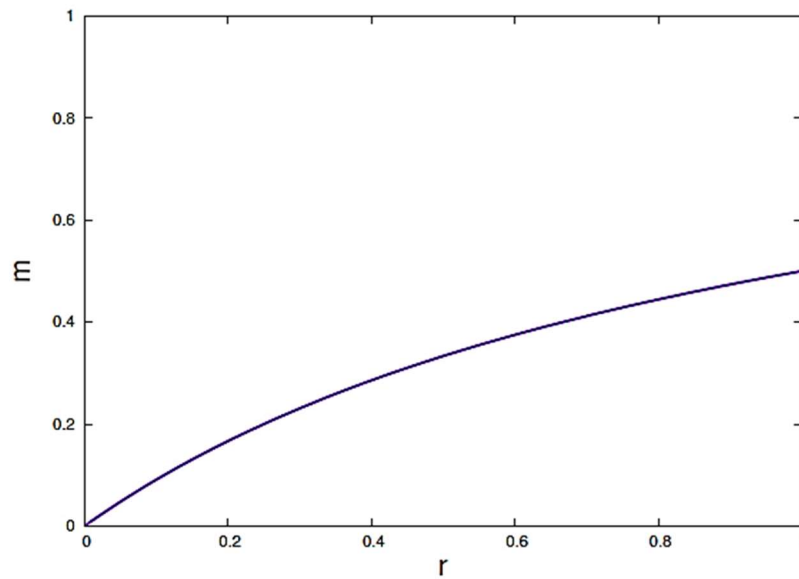
$$\frac{e_s}{e_p} = \frac{r}{1+r} \quad (17)$$

Substituindo a Equação (17) na expressão do indicador m apresentada na Equação (15), obtém-se que

$$m = \frac{r}{1+r} \quad (18)$$

Um gráfico do indicador m em função da fração de massa secundária é mostrado na Figura 14. É possível observar que para $r = Q_s/Q_T = 0$, temos $Q_s = 0$, em que a quantidade de massa reaproveitada ou reciclada é nula e um cenário de Economia Linear com indicador de circularidade m igual a zero. Quando $r \rightarrow 1$, tem-se que $Q_s \approx Q_T$, ou seja, uma situação ideal em que a massa total de produção é advinda quase completamente de maneira secundária. Nesse caso, o valor máximo ideal que pode ser alcançado pelo indicador de circularidade é $m = 1/2$

Figura 14 - Indicador de circularidade m em função da fração de massa secundária r .



Fonte: elaborado pelo autor.

Devido à similaridade das equações, pode-se estender esses resultados para as razões das intensidades de energia e_s/e_p dada pela Equação (17). Assim, numa situação ideal, a intensidade de energia utilizada para processar a massa secundária é a metade da intensidade de energia utilizada para processar a massa primária:

$$e_s = \frac{1}{2} e_p \quad (19)$$

A intensidade de energia empregada está diretamente associada aos custos de produção de uma cadeia de suprimentos. Os resultados obtidos mostram a vantagem de se utilizar massa obtida de uma maneira secundária a partir de processos de reaproveitamento ou reciclagem. Além da vantagem de economia de energia, há ganhos financeiros e ambientais, o que leva a conclusão de que adotar práticas circulares pode ser viável economicamente.

4.3.3 Proposta de indicador termodinâmico

Uma vez que o valor máximo de m é $m_{max} = 1/2$ e tendo em vista um indicador de circularidade que seja normalizado, variando entre 0 e 1, propomos como indicador a expressão apresentada na Equação (20).

$$\varphi = \frac{m}{m_{max}} \quad (20)$$

que, explicitamente, pode ser escrito como

$$\varphi = 2r \left(1 - \frac{e_s}{e_p} \right) \quad (21)$$

ou

$$\varphi = \frac{2r}{1+r} \quad (22)$$

Partindo dessa proposta, é possível medir a circularidade da indústria avícola considerando massa e energia integrados. Com base nos dados médios de produção dos meses de janeiro a outubro de 2019, o indicador φ foi calculado e está apresentado na Tabela 8, juntamente com os demais parâmetros do modelo.

Tabela 8 – Circularidade da indústria avícola.

Medida	Valor
Energia Total E_T	2.540.958,30 kWh
Demanda Total Q_T	14.342.307,15 kg
Produção Primária Q_p	10.761.437,32 kg
Produção Secundária Q_s	3.580.869,82 kg
Intensidade de Energia Primária e_p	0,2214 kWh/kg
Intensidade de Energia Secundária e_s	0,0442 kWh/kg
Circularidade φ	0,3996

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nesses resultados, tem-se uma circularidade de 0,3996, ou cerca de 40%, para a indústria avícola, em contraste com as circularidades de massa e energia de 49% e 4% obtidas a partir do índice proposto por Barros (2019). Esse resultado indica que cerca de 40% dos fluxos de massa e energia da indústria avícola se mantém recirculando no interior da cadeia de suprimentos.

O indicador de circularidade φ também pode ser calculado para o modelo de Economia Circular proposto para a indústria avícola. O modelo, basicamente, sugere a geração de energia elétrica a partir do biogás que pode ser produzido com a cama de frango retirada nas granjas de frango de corte. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Circularidade da indústria avícola economicamente circular.

Medida	Valor
Energia Total E_T	2.147.381,09 kWh
Demanda Total Q_T	14.342.307,15 kg

Medida	Valor
Produção Primária Q_p	8.678.498,62 kg
Produção Secundária Q_s	5.663.808,52 kg
Intensidade de Energia Primária e_p	0,2088 kWh/kg
Intensidade de Energia Secundária e_s	0,0591 kWh/kg
Circularidade φ	0,5662

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados de circularidade do modelo proposto para a indústria avícola, verifica-se um aumento de 42% em relação ao modo convencional de produção. Além disso, a energia total requerida para produção diminuiu, reduzindo a intensidade para produção primária. Esses fatores promoveram uma economia de energia elétrica para a indústria avícola.

A redução da quantidade total de energia empregada diminuiu os custos de produção. Desse modo, além da sustentabilidade econômica, esse aspecto contribuiu para a sustentabilidade ambiental, ao manter materiais potencialmente poluidores no interior da cadeia, o que permite a indústria ter controle sobre os impactos que podem ser gerados.

O indicador de circularidade proposto mostra o potencial de economia de energia que pode ser obtido com as práticas de circularidade de reutilização e reciclagem de materiais, permitindo concluir que a Economia Circular pode promover economia de energia e redução de custos numa indústria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas indústrias alimentícias, observa-se a necessidade de adoção de sistemas de produção sustentáveis para a manutenção da competitividade de modo que se diminua o uso de recursos naturais e os danos ambientais provocados. A Economia Circular pode ser uma alternativa na transição para modelos econômicos que propõem ciclos produtivos regenerativos e autossuficientes.

Com base nessas considerações, o presente trabalho teve como objetivo identificar elementos que pudessem ativar a Economia Circular em uma indústria alimentícia através de indicadores de circularidade. Para tanto, uma metodologia de pesquisa aplicada, exploratória e descritiva foi adotada a partir de uma abordagem combinada em um estudo de caso numa indústria avícola localizada na Região Oeste da Bahia.

A indústria em questão é composta pelos processos de fabricação de rações, produção e incubação de ovos, produção de frango de corte e abate de aves. Inicialmente, a circularidade de todos os processos e da cadeia de suprimentos foi mensurada a partir do índice proposto por Barros (2019) que indica o quão circular é o sistema em termos de material ou energia.

Os resultados obtidos mostraram que os processos da cadeia de suprimentos da indústria avícola apresentam circularidade, em termos de massa, entre 40% e 81%, sendo a fábrica de rações e a granja de produção e incubação de ovos os elos com menor e maior índice, respectivamente. Isso se deve ao fato de que a fábrica de rações recebe grande parte da matéria-prima de fornecedores externos, enquanto que na granja, cerca de 81% dos materiais que adentram na organização, permanecem recirculando na cadeia.

A circularidade total da cadeia da indústria avícola observada foi de 49%, o que significa que menos da metade dos fluxos de materiais permanecem circulando. Em termos de energia, a circularidade total da cadeia foi de 4%, pois toda a cadeia é altamente dependente da rede local de fornecimento de eletricidade.

Com base nos resultados de circularidade obtidos, foi possível identificar os fluxos de material e energia que afetam o valor do índice. No geral, percebeu-se que a cama de frango, resíduo produzido nas granjas, pode ser utilizado para produzir biogás e, conseqüentemente, gerar energia elétrica. Além disso, a gordura de frango gerada no abatedouro tem potencial para produção de biodiesel e uma relação sinérgica entre a indústria avícola e indústrias de produção de biocombustíveis pode ser estabelecida.

Outra relação de sinergia pode ser promovida entre os produtores rurais da região que fornecem matéria-prima para a fábrica de ração, em que o adubo orgânico e parte da cama de

frango produzida pela indústria avícola seria destinada às lavouras em troca de benefícios na compra de grãos.

A partir do modelo de Economia Circular proposto, a circularidade em termos de massa e energia foi recalculada. Em termos de massa, a circularidade da cadeia aumentou para 85% no total, mostrando que cerca de 85% dos fluxos de massa permaneceriam recirculando dentro dos limites da cadeia produtiva.

Em termos de energia, o índice de circularidade mostrou que as granjas de frango de corte têm potencial de se tornarem autossustentáveis em energia elétrica, pois os resíduos da cama de frango têm capacidade de produzir biogás para alimentar todos os processos energéticos da granja. No geral, a circularidade da cadeia em termos de energia aumentou para 27%.

Apesar de permitir a identificação de elementos de ativação da Economia Circular, o índice utilizado, que foi proposto por Barros (2019), apresenta limitações. Do ponto de vista financeiro, o índice mostra que a Economia Circular é desvantajosa, pois, para obter 100% de circularidade, a saída para o público externo à cadeia deve ser nula, impedindo a empresa de comercializar.

Outra limitação é a análise separada dos índices de circularidade de energia e massa, que permite que unidades produtivas tenham altos índices de circularidade energética, mas baixo índice de circularidade em termos de massa, dificultando a análise conjunta dos fluxos que circulam na cadeia de suprimentos.

Diante dessas limitações, um novo indicador que considera os limites termodinâmicos envolvidos nos fluxos de massa e energia foi proposto. O indicador é baseado no reaproveitamento e reciclagem dos fluxos de massa relacionando a intensidade energética para a produção.

O indicador proposto foi calculado para os fluxos da indústria avícola e os resultados mostraram que a circularidade combinada de massa e energia é de cerca de 40%. Com o aproveitamento da cama de frango para a produção de energia elétrica, a circularidade aumenta para 57%, em que se observam o aumento do reaproveitamento de massa e a economia de energia para a produção, fatores diretamente relacionados com os custos de uma cadeia de suprimentos.

A partir de uma análise termodinâmica, foi possível observar que, no caso ideal, a intensidade de energia empregada na produção utilizando massa secundária pode reduzir-se pela metade em relação a energia exigida para o processamento de apenas massa primária, isso fornece o limite de energia que pode ser poupado com as práticas de reutilização e reciclagem

de materiais. A segunda lei da termodinâmica impõe também limitações no processo de recuperação de material, de modo que apenas uma parte de todo o fluxo de massa pode ser reaproveitado.

No geral, o trabalho mostrou que a adoção de sistemas circulares que se baseia na utilização de massa reaproveitada diminui a quantidade de energia total requerida por um sistema. Sabendo que a intensidade de energia utilizada numa indústria está diretamente relacionada aos custos de produção e a geração de resíduos, adotar um modelo de Economia Circular fundamentado no reaproveitamento de massa contribui para o aspecto ambiental da sustentabilidade e pode gerar benefícios econômicos.

O presente trabalho buscou compreender de qual maneira os fluxos de massa e energia podem ser recirculados dentro de uma indústria alimentícia, considerando as limitações termodinâmicas. Para estudos posteriores, acredita-se que é importante incluir na análise dados que não puderam ser estimados ou obtidos de modo que os índices de circularidade calculados possam ser aplicados da prática e sugere-se que uma análise de viabilidade financeira do modelo de Economia Circular proposto seja realizada.

REFERÊNCIAS

- ABEPRO. **Áreas e Sub-áreas de Engenharia de Produção. 2017. Disponível em:** <<http://www.abepro.org.br/interna.asp?p=399&m=424&s=1&c=362>>. Acesso em: 14 out. 2019.
- ABIA. **The Brazilian food and beverage Industry. 2019. Disponível em:** <<https://www.abia.org.br/vsn/temp/z2019730infograficodadoseconomicos2019ABIA.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2019.
- ABREU, Mônica Cavalcanti Sá De; CEGLIA, Domenico. On the implementation of a circular economy: The role of institutional capacity-building through industrial symbiosis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 138, n. June, p. 99–109, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.001>>.
- ALDIN, Vitor. **GERAÇÃO DE ENERGIA NA AVICULTURA DE CORTE A PARTIR DA CAMA DE AVIÁRIO. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013. Disponível em:** <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/756/1/PB_PPGEE_M_Baldin%2C%20Vitor_2013.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2020.
- ALHELOU, Hassan Haes *et al.* A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges. **Energies**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.682-710, 20 fev. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en12040682>.
- AVILA, V. S.; MAZZUCO, H.; FIGUEIREDO, E. A. P.. Cama de Aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante. **Circular Técnica**, Concórdia, v. 16, p.6-38, 1992. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/67877/1/CUsersPiazzonDocumentsProntosCNPSA-DOCUMENTOS-16-CAMA-DE-AVIARIO-MATERIAIS-REUTILIZACAO-USO-COMO-ALIMENTO-E-FERTILIZANTE-FL-12.pdf>>. Acesso em: 01 jan. 2020.
- AGYEMANG, Martin *et al.* Drivers and barriers to circular economy implementation: An explorative study in Pakistan's automobile industry. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 971–994, 2019.
- ALI, Ahmed K.; WANG, Yi; ALVARADO, Jorge L. Facilitating industrial symbiosis to achieve circular economy using value-added by design: A case study in transforming the automobile industry sheet metal waste-flow into Voronoi facade systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 1033–1044, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.202>>.
- ALVES, Angela Maria. **Proposta de um estrutura de medição para qualidade do SPB - Software Público Brasileiro. 2013. 365 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013**
- ARAÚJO, Ana Paula Caixeta. **PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS ORGÂNICOS UTILIZANDO BIODIGESTOR ANAERÓBICO. 2017. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.**

- AVDIUSHCHENKO, Anna; ZAJAÇ, Paweł. Circular economy indicators as a supporting tool for european regional development policies. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 11, p. 1–22, 2019.
- AZEVEDO, Susana Garrido; GODINA, Radu; MATIAS, João Carlos de Oliveira. Proposal of a sustainable circular index for manufacturing companies. **Resources**, v. 6, n. 4, p. 1–24, 2017.
- BAIMYRZAEVA, Mahabat. Beginners' Guide for Applied Research Process: What Is It, and Why and How to Do It? **University Of Central Asia**, Kyrgyz Republic, n. 1, p.1-46, 2018.
- BANAITE, Daiva; TAMOSIUNIENE, Rima. SUSTAINABLE DEVELOPMENT: THE CIRCULAR ECONOMY INDICATORS' SELECTION MODEL. **JOURNAL OF SECURITY AND SUSTAINABILITY ISSUES**, v. 6, n. 2, p. 315–323, 2016.
- BARRERA, Paulo. **Biodigestores: Energia, Fertilidade e Saneamento Para a Zona Rural**. 3. ed. São Paulo: Ícone, 2011.
- BARROS, Murilo Vetroni. **FERRAMENTA PARA PROMOVER A ECONOMIA CIRCULAR EM PROPRIEDADES RURAIS**. 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Produção, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019a.
- BARROS, Pedro Henrique Batista de. **ESSAYS ON ENVIROMENTAL AND DEVELOPMENT ECONOMICS**. 2019. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019b.
- BASAK, Avizit *et al.* Supply chain management in garments industry. **Global Journal of Management and Business Research: A Administration and Management**, v. 14, n. 11, p. 94–97, 2014.
- BENJUMEA, Carmen de La Cuesta. THE QUALITY OF QUALITATIVE RESEARCH: FROM EVALUATION TO ATTAINMENT. **Texto & Contexto - Enfermagem**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.883-890, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-070720150001150015>
- BERTECHINI, A.G. **Nutrição de Monogástricos**, Lavras – MG, 1997. 255p.
- BOCKEN, Nancy M.P. *et al.* Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 33, n. 5, p. 308–320, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>>.
- BORRELLO, Massimiliano *et al.* The Seven Challenges for Transitioning into a Bio-based Circular Economy in the Agri-food Sector. **Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture**, v. 8, n. 1, p. 39–47, 2016.
- BORTOLETO, Gisele Gonçalves *et al.* Produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos de frango. **Bioenergia em Revista: diálogos**, Piracicaba, v. 7, n. 2, p.77-97, dez. 2017. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/6d1a/b2ad1a4e146bb5d9b878ad5186b70de30a4f.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2020.

BRASIL. LEI Nº 6.938, DE 31 DE AGOSTO DE 1981. **Política Nacional do Meio Ambiente**, Brasília, 1981.

BRESSANELLI, Gianmarco; PERONA, Marco; SACCANI, Nicola. Reshaping the Washing Machine Industry through Circular Economy and Product-Service System Business Models. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 43–48, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.065>>.

CARDOSO DE OLIVEIRA, Mara Cristina *et al.* Paving the way for the circular economy and more sustainable supply chains: Shedding light on formal and informal governance instruments used to induce green networks. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 30, n. 5, p. 1095–1113, 2019.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE MOTORIZADO DE PASSAGEIROS NOS GRANDES CENTROS URBANOS BRASILEIROS. **Texto Para Discussão**, Brasília, v. 1606, p.01-42, abr. 2011. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1578/1/td_1606.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2020

CARVALHO, Roberto T. Losito de. Estudo comparativo da eclodibilidade de ovos tipo "EVA" e "B" da raça New-hampshire, do pêso dos pintos ao nascer e da biabilidade de sua criação. **An. Esc. Super. Agric. Luiz de Queiroz [online]**. 1968, vol.25, pp.259-270. ISSN 0071-1276. <http://dx.doi.org/10.1590/S0071-12761968000100023>.

CAUCHICK-MIGUEL, Paulo Augusto. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

CENTENARO, Graciela Salete; FURLAN, Valcenir Júnior Mendes; SOUZA-SOARES, Leonor Almeida de. Gordura de frango: alternativas tecnológicas e nutricionais. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n. 3, p.6199-630, set. 2008.

CNI. **Dois terços das indústrias têm prejuízos com falhas no fornecimento de energia elétrica, diz pesquisa da CNI**. 2016. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/infraestrutura/dois-tercos-das-industrias-tem-prejuizos-com-falhas-no-fornecimento-de-energia-eletrica-diz-pesquisa-da-cni/>>. Acesso em: 04 jan. 2020.

CNI. **A importância da indústria no Brasil**. 2019. Disponível em: <industriabrasileira.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 14 out. 19.

CULLEN, Jonathan M. Circular Economy: Theoretical Benchmark or Perpetual Motion Machine? **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 483–486, 2017.

CUSENZA, Maria Anna *et al.* Energy and environmental benefits of circular economy strategies: The case study of reusing used batteries from electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 25, n. July, p. 100845, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100845>>.

DEB, Dipankar; DEY, Rajeeb; BALAS, Valentina E.. **Engineering Research Methodology: A practical insight for researchers**. Singapore: Springer, 2019. E-Book. ISBN 978-981-13-2947-0. Disponível em: <<http://elibrary.bsi.ac.id/ebook/view.php?id=1122&judul=engineering-research->

methodology-a-practical-*insight*-for-researchers#your_book_name/page5>. Acesso em: 05 jul 2019.

DE JESUS, Ana; MENDONÇA, Sandro. Lost in Transition? Drivers and Barriers in the Eco-innovation Road to the Circular Economy. **Ecological Economics**, v. 145, p. 75–89, 2018.

DI MAIO, Francesco *et al.* Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 163–171, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.009>>.

ELIA, Valerio; GNONI, Maria Grazia; TORNESE, Fabiana. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2741–2751, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Economia Circular**. 2017. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular-1/principios-1>>. Acesso em: 12 out. 2019a.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Food and the Circular Economy**. 2017. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/food-cities-the-circular-economy>> Acesso em: 12 out. 2019b.

EMBRAPA (a). **Matopiba**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-matopiba/sobre-o-tema>>. Acesso em: 19 jul. 2019.

EMBRAPA (b). **Sobre Biocombustíveis**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/matprima1_000g7pcetcc02wx5ok0wtedt32e6jis7.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2020.

EMC. *Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity*. 2015. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/insight/Circularity-Indicators_Methodology_May2015.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2019.

FIGGE, Frank *et al.* Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy. **Ecological Economics**, v. 150, n. May, p. 297–306, 2018a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.030>>.

FIGGE, Frank *et al.* Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy. **Ecological Economics**, v. 150, n. May, p. 297–306, 2018b.

FIUZA, Marcos Silva. **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS OVOS COMERCIALIZADOS EM FEIRA DE SANTANA/BA**. 2014. 28 f. TCC (Graduação) - Curso de Zootecnia, Departamento de Zootecnia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/15688/1/TCC_FIUZA_vers%C3%A3o_PDF_fina%20l.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2019.

FOGARASSY, Cs. *et al.* the Development of a Circular Evaluation (Cev) Tool – Case Study for the 2024 Budapest Olympics. **Hungarian Agricultural Engineering**, v. 7410, n. 31, p. 10–20, 2017.

FRANKLIN-JOHNSON, Elizabeth; FIGGE, Frank; CANNING, Louise. Resource duration as

a managerial indicator for Circular Economy performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 589–598, 2016.

GARCÉS-AYERBE, Concepción *et al.* Is it possible to change from a linear to a circular economy? An overview of opportunities and barriers for european small and medium-sized enterprise companies. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 5, 2019.

GARCÍA-BARRAGÁN, Juan F.; EYCKMANS, Johan; ROUSSEAU, Sandra. Defining and Measuring the Circular Economy: A Mathematical Approach. **Ecological Economics**, v. 157, n. December 2018, p. 369–372, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.003>>.

GENOVESE, Andrea *et al.* Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. **Omega (United Kingdom)**, v. 66, p. 344–357, 2017. Disponível em: <<http://eprints.whiterose.ac.uk/94835/>>.

GEORGE, Donald A R; LIN, Brian Chi ang; CHEN, Yunmin. A circular economy model of economic growth. **Environmental Modelling and Software**, v. 73, p. 60–63, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.06.014>>.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOPINATH, Athira *et al.* A circular framework for the valorisation of sugar industry wastes: Review on the industrial symbiosis between sugar, construction and energy industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 203, p. 89–108, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.252>>.

GOVINDAN, Kannan; HASANAGIC, Mia. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 278–311, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141>>.

Gutowski, T. G. **Thermodynamics and recycling, a review**. IEEE, 10103927, 2008.

GUTOWSKI, Timothy G. *et al.* The energy required to produce materials: constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. **Philosophical Transactions Of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s.l.], v. 371, n. 1986, p.1-15, 13 mar. 2013. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0003>.

HAMMARBERG, K.; KIRKMAN, M.; LACEY, S. de. Qualitative research methods: when to use them and how to judge them. **Human Reproduction**, [s.l.], v. 31, n. 3, p.498-501, 11 jan. 2016. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/humrep/dev334>.

HANIF, Imran; GAGO-DE-SANTOS, Pilar. The importance of population control and macroeconomic stability to reducing environmental degradation: An empirical test of the environmental Kuznets curve for developing countries. **Environmental Development**, v. 23, n. December 2016, p. 1–9, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2016.12.003>>.

HART, Jim *et al.* Barriers and drivers in a circular economy: The case of the built environment. **Procedia CIRP**, v. 80, p. 619–624, 2019. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.015>>.

HELANDER, Hanna *et al.* How to monitor environmental pressures of a circular economy: An assessment of indicators. **Journal of Industrial Ecology**, p. 1–14, 2019.

HENN, João Dionísio. **Modelagem da emissão de dióxido de carbono na produção de frangos de corte**. 2013. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Zootecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/animalscience/documents/theses-and-dissertations/2013/MODELING%20CARBON%20DIOXIDE%20EMISSION%20IN%20BROILER%20PRODUCTION.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

HUYSMAN, Sofie *et al.* Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 46–54, 2017.

IACOVIDOU, Eleni *et al.* Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 910–938, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.100>>.

JURAS, I.A.G.M.. **Os impactos da indústria no meio ambiente**. 2015. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/publicacoes-da-consultoria-legislativa/areas-da-conle/tema14/impactos-da-industria-no-meio-ambiente_ilidia-juras_politicas-setoriais> Acesso em: 12 out. 2019.

JURGILEVICH, Alexandra *et al.* Transition towards circular economy in the food system. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 1, p. 1–14, 2016.

KAYAL, Bassam *et al.* An economic index for measuring firm's circularity: The case of water industry. **Journal of Behavioral and Experimental Finance**, v. 21, p. 123–129, 2019.

KIRCHHERR, Julian *et al.* Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). **Ecological Economics**, v. 150, n. April, p. 264–272, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>>.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. September, p. 221–232, 2017.

KORHONEN, Jouni *et al.* Circular economy as an essentially contested concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 544–552, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.111>>.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, p. 37–46, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>>.

KRAVCHENKO, Mariia; PIGOSSO, Daniela C A; MCALOONE, Tim C. Towards the ex-ante sustainability screening of circular economy initiatives in manufacturing companies : Consolidation of leading sustainability-related performance indicators. v. 241, 2019.

- KUMAR, Vikas *et al.* Circular economy in the manufacturing sector: benefits, opportunities and barriers. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 1067–1086, 2019.
- LASO, Jara *et al.* Finding an economic and environmental balance in value chains based on circular economy thinking: An eco-efficiency methodology applied to the fish canning industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, n. December 2017, p. 428–437, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.004>>.
- LIEDER, Michael; RASHID, Amir. Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 115, p. 36–51, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>>.
- LIMA, Nilsa D.s.; NÄÄS, I.a.; GARCIA, R.g.. PEGADA DE CARBONO NA PRODUÇÃO INTENSIVA DE FRANGOS DE CORTE. In: INTERNATIONAL WORKSHOP - ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 6., 2017, São Paulo. **Academic Work**. São Paulo: Feagri, 2017. p. 01 - 16. Disponível em: <http://www.advancesincleanerproduction.net/sixth/files/sexoes/5B/6/lima_nds_et_al_presentation.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2020.
- LINDER, Marcus; SARASINI, Steven; VAN LOON, Patricia. A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 545–558, 2017.
- LOPES, Guilherme Byrro. **Um estudo sobre a Curva Ambiental de Kuznets e a convergência da Pegada Ecológica**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2013.
- MAGNIER, Celine. **10 Key Indicators for Monitoring the Circular Economy**. n. March, p. 36, 2017. Disponível em: <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Datalab/2017/datalab-18-economie-circulaire-Edition-2017-anglais.pdf>. Acesso em 05 jan 2020.
- MARTÍN GÓMEZ, Alejandro M.; AGUAYO GONZÁLEZ, Francisco; MARCOS BÁRCENA, Mariano. Smart eco-industrial parks: A circular economy implementation based on industrial metabolism. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. January, p. 58–69, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.007>>.
- MASI, Donato *et al.* Towards a more circular economy: exploring the awareness, practices, and barriers from a focal firm perspective. **Production Planning and Control**, v. 29, n. 6, p. 539–550, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449246>>.
- MAVI, Neda Kiani; MAVI, Reza Kiani. Energy and environmental efficiency of OECD countries in the context of the circular economy: Common weight analysis for malmquist productivity index. **Journal of Environmental Management**, v. 247, n. January, p. 651–661, 2019.
- METZNER, Cláudio Marcos *et al.* Análise de estudos sobre a viabilidade técnica e econômica do uso da cama de aviários como adubo orgânico. **Custo e Agronegócio**, Recife, v. 11, n. 3, p.02-25, set. 2015.
- MOHAJAN, Haradhan Kumar. Qualitative Research Methodology in Social Sciences and Related Subjects. **Journal Of Economic Development, Environment And People**, Bangladesh, v. 7, n. 1, p.23-48, 2018

MOKTADIR, Md Abdul *et al.* Drivers to sustainable manufacturing practices and circular economy: A perspective of leather industries in Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1366–1380, 2018a.

MOKTADIR, Md Abdul *et al.* Drivers to sustainable manufacturing practices and circular economy: A perspective of leather industries in Bangladesh. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1366–1380, 2018b.

MOLINA-SÁNCHEZ, Emiliano *et al.* Proposal of sustainability indicators for the waste management from the paper industry within the circular economy model. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 8, p. 1–17, 2018.

MONTAGNA, Tainara Bruna. **LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE TÉCNICAS PARA DISPOSIÇÃO E TRATAMENTO DE DEJETOS DE SUÍNOS E DE AVES EM ESTABELECIMENTOS RURAIS FAMILIARES**. 2017. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, 2017. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2986/5/Tainara_Bruna_Montagna_2017.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2020.

MORAGA, Gustavo *et al.* Circular economy indicators: What do they measure? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, n. March, p. 452–461, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>>.

MOREIRA, Ana Luísa de Vasconcelos. **Produção de biodiesel a partir de gordura de frango**. 2009. 61 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Porto, Porto, 2009.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. **Journal of Business Ethics**, v. 140, n. 3, p. 369–380, 2017.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do. **Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática – como elaborar TCC**. Brasília: Thesaurus, 2016.

NASCIMENTO, Jucilene Silva do *et al.* INFLUÊNCIA DO PESO DO OVO SOBRE A ECLODIBILIDADE E O PESO DO PINTO AO NASCIMENTO. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 21, p.1210-1216, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2015b/agrarias/influencia%20do%20peso%20do%20ovo.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 19.

NASIR, Mohammed Haneef Abdul *et al.* Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction industry. **International Journal of Production Economics**, v. 183, p. 443–457, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008>>.

NASSAJI, Hossein. Qualitative and descriptive research: Data type *versus* data analysis. **Language Teaching Research**, [s.l.], v. 19, n. 2, p.129-132, 26 fev. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1362168815572747>.

NGAN, Sue Lin *et al.* Prioritization of sustainability indicators for promoting the circular economy: The case of developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, n. March, p. 314–331, 2019a. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.001>>.

NGAN, Sue Lin *et al.* Prioritization of sustainability indicators for promoting the circular economy: The case of developing countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, n. March, p. 314–331, 2019b.

NIERO, Monia; KALBAR, Pradip 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**, v. 140, n. September 2018, p. 305–312, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>>.

NOYES, Jane *et al.* Synthesising quantitative and qualitative evidence to inform guidelines on complex interventions: clarifying the purposes, designs and outlining some methods. **Bmj Global Health**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.1-14, jan. 2019. BMJ. <http://dx.doi.org/10.1136/bmjgh-2018-000893>.

PAGOTTO, Murilo; HALOG, Anthony. Towards a Circular Economy in Australian Agri-food Industry: An Application of Input-Output Oriented Approaches for Analyzing Resource Efficiency and Competitiveness Potential. **Journal of Industrial Ecology**, v. 20, n. 5, p. 1176–1186, 2016.

PALHARES, Julio César Pascale. Uso da Cama de Frango na Produção de Biogás. **Circular Técnica**, Concórdia, v. 41, p.1-12, dez. 2004. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_publicacoes/cit41.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2020.

PARCHOMENKO, Alexej *et al.* Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 200–216, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.357>>.

PARIDA, Vinit *et al.* Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. **Journal of Business Research**, v. 101, n. January, p. 715–725, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.006>>.

PELOROSSO, R.; GOBATTONI, F.; LEONE, A. The low-entropy city: A thermodynamic approach to reconnect urban systems with nature. **Landscape and Urban Planning**, v. 168, n. March 2016, p. 22–30, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.002>>.

PIRES, Ana; MARTINHO, Graça. Waste hierarchy index for circular economy in waste management. **Waste Management**, v. 95, p. 298–305, 2019.

PRIETO-SANDOVAL, Vanessa; JACA, Carmen; ORMAZABAL, Marta. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605–615, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>>.

PRINCIPATO, Ludovica *et al.* Adopting the circular economy approach on food loss and waste: The case of Italian pasta production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 144, n. August 2018, p. 82–89, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.025>>.

RAJEEV, A. *et al.* Evolution of sustainability in supply chain management: A literature

review. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 299–314, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>>.

REIKE, Denise; VERMEULEN, Walter J.V.; WITJES, Sjors. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. November 2017, p. 246–264, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027>>.

RITZÉN, Sofia; SANDSTRÖM, Gunilla Ölundh. Barriers to the Circular Economy - Integration of Perspectives and Domains. **Procedia CIRP**, v. 64, p. 7–12, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.005>>.

SAIDANI, Michael *et al.* A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542–559, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>>.

SALIMATH, Manjula S.; CHANDNA, Vallari. Sustainable consumption and growth: Examining complementary perspectives. **Management Decision**, 2018.

SANTOS, Felipe C.b.; DUBEUX, Carolina B.s.; PEREIRA JUNIOR, Amaro Olímpio. **Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental**. Rio de Janeiro: Coppe, 2015. Disponível em: <http://www.centroclima.coppe.ufrj.br/images/documentos/ies-brasil-2050/04_IES_Brasil_2050_setor_industrial_v3.pdf>. Acesso em: 13 out. 2019.

SHARMA, Yogesh Kumar *et al.* When challenges impede the process: For circular economy-driven sustainability practices in food supply chain. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 995–1017, 2019.

SILVA, Naiane da Rocha *et al.* Influência do peso do ovo sobre os índices produtivos de galinha naturalizadas sem ecótipo definido no Meio-Norte do Brasil. In: X CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2015, Teresina. **Anais CNPA**. Teresina: Cnpa, 2015. p. 1 - 3. Disponível em: <<http://www.cnpa2015.com.br/anais/resumos/R0333-2.pdf>>. Acesso em: 31 dez. 19.

SINGH, Poonam; GIACOSA, Elisa. Cognitive biases of consumers as barriers in transition towards circular economy. **Management Decision**, v. 57, n. 4, p. 921–936, 2019.

SKENE, Keith Ronald. Circles, spirals, pyramids and cubes: Why the circular economy cannot work. **Sustainability Science**, v. 13, n. 2, p. 479–492, 2018.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair. **Operations and Process Management**. 5. ed. Harlow: [s.n.], 2018.

SMOL, Marzena; KULCZYCKA, Joanna; AVDIUSHCHENKO, Anna. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 3, p. 669–678, 2017.

STAUB, L.; SOUZA, V.; TON, A. P. S.. Manejos para reutilização da cama aviária. **Scientific Electronic**, Rondonópolis, v. 10, n. 5, p.163-176, out. 2017. Disponível

em:

<<http://www.seasinop.com.br/revista/index.php?journal=SEA&page=article&op=view&path%5B%5D=362&path%5B%5D=pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2020.

TANTAU, Adrian Dumitru; MAASSEN, Maria Alexandra; FRATILA, Laurentiu. Models for analyzing the dependencies between indicators for a circular economy in the European Union. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 7, 2018.

TESSARO, Alessandra Buss *et al.* Potencial Energético da Cama de Aviário Produzida na Região Sudoeste do Paraná e Utilizada como Substrato para a Produção de Biogás. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [s.l.], v. 8, n. 2, p.357-377, 3 ago. 2015. Centro Universitario de Maringa. <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2015v8n2p357-377>.

TOMIELLO, Carolina Rombaldi. **POTENCIAL DO ÓLEO DE FRANGO COMO MATRIZ LIPÍDICA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL**. 2014. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

TRALDI, Ab *et al.* ESTUDO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM O PESO DE PINTOS DE UM DIA: IDADE DA MATRIZ E PESO DO OVO. In: PRÊMIO LAMAS, 2009, Campinas. **Anais do Prêmio Lamas**. Campinas: Facta, 2009. Disponível em: <https://www.avisite.com.br/cet/img/20100506_peso_do_ovo.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2019.

TUOMISTO, Hanna L. *et al.* Effects of environmental change on agriculture, nutrition and health: A framework with a focus on fruits and vegetables. **Wellcome Open Research**, [s.l.], v. 2, p.2-21, 31 out. 2017. F1000 (Faculty of 1000 Ltd). <http://dx.doi.org/10.12688/wellcomeopenres.11190.2>.

VAN SCHALKWYK, R. F. *et al.* Challenges of digitalizing the circular economy: Assessment of the state-of-the-art of metallurgical carrier metal platform for lead and its associated technology elements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 585–601, 2018.

WINKLER, H. Closed-loop production systems-A sustainable supply chain approach. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n. 3, p. 243–246, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2011.05.001>>.

WITJES, Sjors; LOZANO, Rodrigo. Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 112, p. 37–44, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.015>>.

XAVIER, Lúcia Helena *et al.* Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, n. August, p. 101467, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301420717305433>>.

XUE, Yu-nan *et al.* Environmental and economic benefits of carbon emission reduction in animal husbandry via the circular economy: Case study of pig farming in Liaoning, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 238, p. 117968, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117968>>.

YILMAZ, Kaya. Comparison of Quantitative and Qualitative Research Traditions: epistemological, theoretical, and methodological differences. **European Journal Of Education**, [s.l.], v. 48, n. 2, p.311-325, 2013.

YIN, Robert K.. **Case Study Research and Applications: Design and Methods**. 6. ed. Los Angeles: Sage, 2018.

YING, Jiang; LI-JUN, Zhou. 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials Science Study on Green Supply Chain Management Based on Circular Economy peer-review under responsibility. **Physics Procedia**, v. 25, p. 1682–1688, 2012. Disponível em: <www.sciencedirect.com>.

ZAMAN, Atiq Uz; LEHMANN, Steffen. The zero waste index: A performance measurement tool for waste management systems in a “zero waste city”. **Journal of Cleaner Production**, v. 50, p. 123–132, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.041>>.

ZANETTI, Micheli. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE GORDURA ABDOMINAL DE FRANGOS**. 2012. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

ZAOUAL, Anne Ryslène; LECOCQ, Xavier. Orchestrating Circularity within Industrial Ecosystems: Lessons from Iconic Cases in Three Different Countries. **California Management Review**, v. 60, n. 3, p. 133–156, 2018.

ZENG, Huixiang *et al.* Institutional pressures, sustainable supply chain management, and circular economy capability: Empirical evidence from Chinese eco-industrial park firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, n. May 2014, p. 54–65, 2017a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.093>>.

ZENG, Huixiang *et al.* Institutional pressures, sustainable supply chain management, and circular economy capability: Empirical evidence from Chinese eco-industrial park firms. **Journal of Cleaner Production**, v. 155, p. 54–65, 2017b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.093>>.

ZHANG, Abraham *et al.* Barriers to smart waste management for a circular economy in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118198, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118198>>.

APENDICE A - Roteiro para entrevista e coleta de dados

1. Você conhece ou já ouviu falar sobre a Economia Circular?
2. Quais elementos e processos compõem a cadeia de suprimentos da organização?
3. No processo produtivo, quais os tipos de resíduos são gerados? A empresa aplica ações para a eliminação e/ou reutilização destes?
4. Quais ações voltadas à produção sem agredir o meio ambiente são desenvolvidas pela empresa?
5. A empresa utiliza energia proveniente de fonte renovável?
6. Há processos ao longo da cadeia de suprimentos em que a água é reutilizada?
7. Há políticas ambientais ou critérios de sustentabilidade para o processo de seleção dos fornecedores?
8. Há um setor que atua na gestão ambiental da organização?
9. Para cada processo da organização, resumir as entradas e saídas, conforme tabela abaixo, para coleta de dados quantitativos.

Processo:

Entradas			Saídas		
Fornecedor	Material/Energia	Especificação	Material/Energia	Especificação	Cliente