



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA
CONSTRUÇÃO CIVIL BASEADA NA ANÁLISE E
APLICAÇÃO DA EMERGY ANALYSIS (EmA) EM
EDIFICAÇÕES**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE
POR**

LUANDA REGINA REIS LIMA

Orientador: Prof. Marcelo Hazin Alencar, DSc

Caruaru - 2017

LUANDA REGINA REIS LIMA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO
CIVIL BASEADA NA ANÁLISE E APLICAÇÃO DA EMERGY ANALYSIS
(EMA) EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação ou Tese apresentado(a) ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção

Área de concentração: Otimização e Gestão de Produção

Orientador : Profº Drº Marcelo Hazin Alencar

Caruaru – 2017

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva CRB/4 - 1878

L732s Lima, Luanda Regina Reis.

Avaliação da sustentabilidade na indústria da construção civil baseada na análise e aplicação da Emergy Anaçysis (EmA0 em edificações. / Luanda Regina Reis Lima. - 2017.

70f. il.: 30 cm.

Orientador: Marcelo Hazin Alencar.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.

Inclui Referências.

1. Sustentabilidade (Brasil). 2. Avaliação (Brasil). 3. Indústria de construção civil (Brasil). 4. Recursos naturais (Brasil). I. Alencar, Marcelo Hazin (Orientador). II. Título.

658.5 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2017-379)

LUANDA REGINA REIS LIMA

**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO
CIVIL BASEADA NA ANÁLISE E APLICAÇÃO DA EMERGY ANALYSIS (EMA)
EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação ou Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 18/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^o. Dr. Marcelo Hazin Alencar (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^o. Dr. Adiel Texeira de Almeida Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^o. Dr. Renata Maciel de Melo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por estar presente sempre comigo e por ter me ajudado nas dificuldades e vitórias ao longo dessa jornada.

Ao professor Marcelo Hazin Alencar pela orientação, apoio e importante contribuição em todos os momentos durante esse trabalho, destacando sua paciência, disponibilidade e humildade para me ajudar nas dificuldades que apresentei, sempre auxiliando nos momentos de indecisões e dúvidas.

À minha querida e amada mãe, Maria do Carmo, por sempre sonhar e acreditar junto comigo, me oferecendo amor e colo, incentivando a superar todas as dificuldades.

Ao meu pai, Roberto, por ter me ensinado que a perseverança e a fé fazem com que tudo seja realizado da melhor maneira possível.

À minha família, em especial aos meus padrinhos, Anita e Alexandre, minha avó Helena e à minha grande amiga e prima, Ana, que ao longo da minha vida sempre me ensinaram, incentivaram e apoiaram em todas as fases caminhadas, me ouvindo e oferecendo amor e dedicação ao meu lado.

À minha amada irmã caçula, Ana, que sempre me incentivou e torceu em cada etapa vivida.

Aos meus amigos que entenderam a minha ausência em muitos momentos e mesmo assim me apoiaram.

Aos meus amigos do PPGE/UFPA Mísia, Lorena, Ramon, Pablo, Viviane e em especial, Fernanda e Diego que compartilharam comigo seus conhecimentos, momentos de dificuldades e também momentos de alegria, fazendo com que chegasse até aqui.

Por fim, agradeço a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pelo apoio dado, pois sem este apoio não seria possível dar andamento ao trabalho aqui apresentado.

RESUMO

A demanda por recursos naturais tem aumentado nos últimos anos. Devido a esse cenário, com finalidade de avaliar a sustentabilidade em um processo, várias ferramentas foram desenvolvidas, dentre elas, o *Emergy Analysis* (EmA). EmA, que apresenta em seu conceito a relação de toda energia necessária para um sistema produzir um produto/serviço, baseado pela energia consumida de seus recursos, vem ganhando destaque na literatura. A aplicação da EmA permite analisar o desempenho de diferentes elementos que compõe um sistema, em diversos contextos, avaliando assim a sustentabilidade. Diante disso, este estudo analisou 29 estudos publicados na base de dados *Web of Science - Main Collection (Thomson Reuters Scientific)* e na base SCOUPS no período de 2000 a 2016, com objetivo apresentar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a temática EmA no contexto da construção civil, visto que não foi encontrado anteriormente um levantamento estruturado sobre o assunto abordado. Foram apresentadas contribuições dos dados coletados, como por exemplo: quantidade de estudos por periódicos, artigos mais publicados na área, número de publicações por ano, equações matemáticas utilizadas. Com base na pesquisa realizada foi proposto um framework, apresentando as principais etapas para realizar o cálculo de emergia no contexto da indústria da construção civil. Em seguida, foi realizada a análise de emergia para uma casa de um conjunto habitacional padrão (48m²), direcionado às famílias de baixa renda, com objetivo de calcular a emergia dos valores de cada recurso analisado e os principais índices que a metodologia EmA utiliza (rendimento de emergia, carga ambiental e índice de sustentabilidade). A análise conduzida nesta pesquisa teve a finalidade de exemplificar e fornecer dados relevantes sobre a temática, contribuindo para a divulgação da temática para as organizações, pesquisadores e sociedade, além de fornecer informações relevantes para o direcionamento de futuras pesquisas.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Avaliação. Indústria da construção civil. Recursos naturais.

ABSTRACT

Demand for natural resources has increased in recent years. Due to this scenario, in order to evaluate sustainability in a process, several tools have been developed, among them Emergy Analysis (EmA). EmA, which presents in its concept the relation of all the energy required for a system to produce a product / service, based on the energy consumed by its resources, has been gaining prominence in the literature. The application of EmA allows analyzing the performance of different elements that make up a system, in several contexts, thus evaluating sustainability. Therefore, this study analyzed 29 studies published in the Web of Science - Main Collection database (Thomson Reuters Scientific) and in the SCOUPS database from 2000 to 2016, aiming to present a Systematic Review of Literature (RSL) on EmA in the context of civil construction, since a structured survey on the subject was not previously found. Contributions of the collected data were presented, such as: number of studies by journals, most published articles in the area, number of publications per year, mathematical equations used. Based on the research, a framework was proposed, presenting the main steps to perform the calculation of emergy in the context of the civil construction industry. Next, the emergy analysis was performed for a house in a standard housing set (48m²), aimed at low income families, with the purpose of calculating the emergence of the values of each resource analyzed and the main indexes used by the EmA methodology (emergy yield, environmental load and sustainability index). The analysis conducted in this research aimed to exemplify and provide relevant data on the subject, contributing to the dissemination of the issue to organizations, researchers and society, as well as providing information relevant to the direction of future research.

Keywords: Sustainability. Performance. Construction industry. Natural resources.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma Padrão para realizar uma RSL para este estudo.....	18
Figura 2- Fluxograma do Processo de Seleção dos Artigos.....	19
Figura 3- Número de Artigos Publicados por Ano	33
Figura 4- Porcentagem dos Continentes que aplicaram EmA	36
Figura 5- Fluxo Padrão de Aplicação para a metodologia EmA	41
Figura 6- Fluxograma com atividades para realizar Aplicação do EmA.....	45
Figura 7- Atividades para EmA com equações clássicas.....	48
Figura 8- Casa padrão(conjunto habitacional) para famílias de baixa renda	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência dos Estudos por Periódicos	35
Tabela 2 - Etapa da Obra considerada em cada estudo na Aplicação do EmA	37
Tabela 3- Equações utilizadas como princípio fundamental do Cálculo EmA.....	42
Tabela 4- Classificação dos Modelos Analíticos encontrados na literatura.....	43
Tabela 5- Cálculo de Emergia dos Recursos que serão analisados.....	52
Tabela 6- Cálculo de Insumos de EmA e índices ambientais (und: x 10 ¹⁵ sej/ano)	55
Tabela 7- Símbolos da linguagem de fluxos	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo Geral	13
1.1.1	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Estrutura da Dissertação	14
2	METODOLOGIA	16
2.2	Condução da Revisão	16
2.3	Considerações Finais sobre o Capítulo	20
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1	Sustentabilidade	21
3.2	Sustentabilidade na Indústria da Construção Civil	21
3.3	Ferramentas Aplicadas à Sustentabilidade e à indústria da Construção Civil	22
3.4	Emergy Analysis	22
3.5	Principais Conceitos Associados ao EmA	23
3.5.1	Linha de Base Global	24
3.5.2	Transformidade	25
3.5.3	Construção do Diagrama	25
3.5.4	Indicadores baseados em Emergia	26
3.6	Considerações Finais sobre o Capítulo	27
4	REVISÃO DA LITERATURA	28
4.1	Aplicação do EmA na Indústria da Construção	28

4.2	Considerações Finais sobre o Capítulo	32
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA RSL E DISCUSSÕES	33
5.1	Frequência do Número de Publicações dos Artigos por Ano	33
5.2	Frequência dos Estudos por Periódicos	34
5.3	Porcentagem das Regiões que Aplicaram EmA	36
5.4	Etapa da Obra	36
5.5	Linha de Base utilizadas nos Estudos	38
5.6	Vantagens e Limitações	39
5.7	Modelos Analíticos encontrados na Literatura	42
5.8	Proposta de Fluxograma para o EmA no Contexto da Indústria da Construção	44
5.9	Modelos Analíticos Considerados Clássicos para Calcular Emergia	46
5.10	Exemplo Ilustrativo	48
5.10.1	Definições das Fases da Obra consideradas para esta pesquisa	49
5.11	Considerações Finais sobre o Capítulo	56
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICE A – SÍMBOLOS DO FLUXO DE EMERGIA	69

1 INTRODUÇÃO

Atualmente organizações estão preocupadas em desenvolver e gerir processos com menor impacto ao meio ambiente, visto que os recursos estão em escassez e também a legislação está exigindo o compromisso das empresas com a responsabilidade ambiental, integrando os três pilares da sustentabilidade (social, econômico e ambiental). Para Larcher & Tarascon (2014) sustentabilidade se resume em utilizar os recursos existentes da sociedade atual, sem comprometer a capacidade de crescimento e desenvolvimento das futuras gerações.

Dentro desse âmbito, surge a necessidade de se pesquisar a sustentabilidade na indústria da construção civil, já que este setor contribui significativamente para o esgotamento de recursos, alterações nos ecossistemas, geração de resíduos sólidos, consumo energia, explorando cerca de 40% dos recursos naturais (Mateus et al., 2013; Roodman & Lenssen, 1995). Para Pulselli et al. (2007) diante deste cenário, observa-se que o ideal que o setor de construção civil realizasse políticas ambientais com objetivo de reduzir danos e desperdícios em processos, fazendo com que elevasse a otimização dos recursos, garantindo a alta qualidade, baixos custos e competitividade das empresas. Segundo Papajohn et al. (2017) por meio de indicadores e métodos, é possível quantificar a sustentabilidade de uma obra, seja ela de infra estrutura ou obras de edifícios, fazendo com que essas ferramentas levem eficiência para o sistema, pois ter práticas sustentáveis é favorável nesse contexto.

Outra característica do setor de construção é a produção de materiais que são considerados essenciais e básicos para elaboração de uma obra, como cimento, concreto, aço, que são responsáveis pelas emissões de poluentes na atmosfera, devido as reações físico químicas que envolvem a calcinação de matérias primas e a combustão, contribuindo para o aumento da carga ambiental (Chen et al., 2016). De acordo com Yi et al. (2015) para realizar uma construção é necessário analisar os processos que geram os impactos ambientais, integrando com a dimensão social e econômica, para assim alcançar a efetividade. Portanto, os processos relacionados a indústria da construção com o meio ambiente precisam ser pesquisados, pois existe uma preocupação dos possíveis resultados gerados por esse setor, impactando no meio ambiente e conseqüentemente o fator financeiro e social.

Segundo Alencar et al. (2017), organizações estão cada vez mais conscientes de que

apenas atingir a satisfação do cliente baseado em baixos custos ou baseado na qualidade do produto ou serviço oferecido não é uma garantia de vantagem competitiva. Atualmente, além de superar as expectativas dos clientes, e oferecer produtos de qualidade, as empresas precisam respeitar o meio ambiente, serem éticas e demonstrar que são socialmente responsáveis.

De acordo com a literatura diversos métodos sustentáveis, como *Life Cycle Assessment* (LCA), *Exergy Analysis*, avaliação de risco ambiental estão sendo estudados e aplicados, já que para todo sistema é necessário a integração entre os três pilares da sustentabilidade: meio ambiente, economia e sociedade, independente do processo produtivo envolvido (DIAZ-CHAVES, 2011). No entanto, os principais métodos de avaliação de sustentabilidade não permitem avaliar de maneira ampla contextos relacionados à indústria da construção Yi et al. (2017). Portanto, de acordo com a pesquisa realizada na literatura em alguns estudos publicados como Siracusa & La Rosa (2006); Arias & Brown (2009); Yuan et al. (2011); Gao et al. (2012); Shao et al. (2013); Yi et al. (2015); Pan et al. (2016); (Yi et al., 2017) observou-se que um dos métodos mais empregados nesta área é o *Emergy Analysis* (EmA), o qual fornece uma perspectiva abrangente em diferentes contextos, relacionando diversos parâmetros, fornecendo assim a avaliação sobre sustentabilidade para fluxos de materiais, bens e serviços (Liu et al., 2013). É importante destacar que esse método de contabilidade ambiental desenvolve indicadores quantitativos, os quais podem ser aplicados em diferentes países e em diversos contextos.

Segundo Brown & Ulgiati (2004) EmA é uma ferramenta de contabilidade ambiental que analisa as entradas de um sistema de produção por meio econômico, com base nos princípios da termodinâmica. Para Wu et al. (2013), EmA é um método eficaz para avaliar custos ambientais e econômicos rumo à sustentabilidade. De acordo com Liang et al. (2016) EmA descreve o fluxo dos recursos em um sistema, e auxilia a entender como são organizados, quantificando-os em um meio, com objetivo de fornecer suporte para decisões em organizações ao analisar o nível de sustentabilidade.

De acordo com Yi et al. (2017) é possível fazer uma analogia entre uma construção, por exemplo de um edifício, e uma organização energética, pois o EmA se desenvolve pela compreensão ecológica da energia incorporada no desempenho de sistemas ambientais complexos, por meio do princípio termodinâmico, integrando a construção realizada, natureza e colaboradores.

No entanto, apesar da ampla aplicação dos estudos em EmA, observou-se poucos trabalhos aplicados ao contexto da indústria da construção civil. Desta forma, este estudo

tem como proposta aprofundar os principais conceitos encontrados na literatura sobre EmA, analisar a aplicação desta ferramenta na indústria da construção civil por meio de uma revisão sistemática da literatura e, a partir destas, propor um framework que leva em conta conceitos básicos e parâmetros específicos para o cálculo da emergia, auxiliando assim a aplicação da metodologia no setor da construção civil.

De acordo com Odum (1996), Hau & Bakshi (2004), Paoli et al. (2008), Liu et al. (2015), o conceito de EmA foi proposto pela primeira vez no final da década de 1980, então a análise sistemática da literatura contemplou o período de 1980 a 2016, com base na literatura disponível na base de dados *Web of Science - Main Collection (Thomson Reuters Scientific)* e *Scopus* sobre o EmA, explorando suas principais contribuições, características, aplicações.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise da literatura sobre a metodologia Energy Analysis no contexto da indústria da construção civil, com intuito de identificar aspectos relevantes tratados em artigos científicos, como também apresentar um framework para aplicação da metodologia analisada no setor de construção civil e desenvolver uma aplicação numérica de carácter ilustrativo.

1.1.1 Objetivos Específicos

- ✓ Realizar uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados *Web of Science - Main Collection (Thomson Reuters Scientific)* e *SCOPUS* de acordo com o escopo da pesquisa (artigos que abordaram e aplicaram EmA no setor na construção civil);
- ✓ Identificar a evolução das publicações de artigos que abordam EmA;
- ✓ Avaliar os principais periódicos que tratam o tema;
- ✓ Identificar as principais regiões que abordaram e aplicaram o EmA;
- ✓ Identificar a porcentagem da etapa da obra nos estudos;
- ✓ Apresentar as principais linhas de base utilizadas;
- ✓ Descrever as principais equações matemáticas clássicas existentes na literatura sobre o tema em estudo;
- ✓ Desenvolver um framework com finalidade de orientar pesquisadores em futuras aplicações da metodologia EmA;
- ✓ Apresentar uma aplicação numérica de carácter ilustrativo da metodologia EmA,

considerando uma casa de um conjunto habitacional direcionado exclusivamente para famílias brasileiras de baixa renda.

1.2 Justificativa

Nos últimos anos, muitos estudiosos têm avaliado diversos contextos com finalidade de analisar o desempenho de produtos e serviços por meio de ferramentas ambientais. Com o número limitado de publicações, métodos sustentáveis foram aplicados no setor de construção civil, como avaliação econômica (Wang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2013), LCA (Reza *et al.*, 2013), análise do fluxo do material (Zhang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2016), que avalia o impacto de determinados fatores no ecossistema, porém esses métodos possuem falhas, pois não consideram parâmetros importantes que devem ser acrescentados para a mensuração da sustentabilidade, afetando a conservação dos recursos e proteção ambiental (Zhang *et al.*, 2017).

Devido a lacuna que pode surgir por meio desses métodos, tem-se a necessidade de realizar uma abordagem que considere a maioria dos recursos disponíveis na Terra, acrescentando os elementos que se deseja analisar e fazendo com que o sistema seja avaliado em uma mesma base de medida.

Portanto, por meio do EmA é possível quantificar informações sobre a sustentabilidade, para assim fornecer conclusões mais robustas e integradas aos decisores. Além disso, diante da literatura sabe-se que este setor gera impactos ambientais a cada ano e que existe poucas pesquisas relacionadas ao EmA no contexto de construção civil, logo, fica evidente a relevância deste estudo, com o intuito de fornecer uma contribuição para organizações, governos e população, para assim ter alternativas de reduzir o impacto e assegurar a sustentabilidade do sistema.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho está estruturado em seis capítulos. O capítulo 1, a Introdução, apresenta a relevância, as contribuições do estudo e os objetivos do trabalho. No capítulo 2, Metodologia, é apresentada a revisão sistemática da literatura realizada neste estudo. O capítulo 3, Fundamentação Teórica, é composto pelos principais conceitos que envolvem EmA encontrados na literatura. Já no capítulo 4, Revisão da Literatura, é apresentada as aplicações desse tema em diversos artigos. No capítulo 5, Apresentação dos Resultados e Discussões, é divulgada a principal contribuição desse trabalho, como também o estudo de caso. E no capítulo 6, Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros, é apresentado o encerramento do

trabalho e seus possíveis desdobramentos para outros pesquisadores.

2 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada as principais características envolvidas na metodologia EmA na indústria de construção civil por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). Segundo Kitchenham & Charters (2007) uma RSL possui três fases principais: planejamento, realização e descrição. Por meio dessas atividades se torna possível conduzir uma RSL, identificando, avaliando e expondo informações disponíveis em estudos, com objetivo de reunir os principais dados e evidências científicas.

2.1 Condução da Revisão

Para um melhor entendimento da condução da revisão e seleção dos trabalhos, foi elaborado um fluxograma, com finalidade de ter procedimentos de forma simples para conduzir uma Revisão Sistemática da Literatura específica para esta pesquisa, definindo critérios de exclusão, conseqüentemente obtendo estudos pré-selecionados até se obter o número de estudos finais que foram analisados (figura 1).

Inicialmente a pesquisa coletou trabalhos encontrados na base de dados *Web of Science - Main Collection (Thomson Reuters Scientific)*, utilizando os seguintes termos de busca: (“*Emergy Analysis*”), em seguida a lógica booleana “and” e os demais termos (*build* OR construct* OR “construction industry” OR materials OR cement OR plaster OR structure OR risk OR “sustainable development” OR sustain* OR green*), no período de 1980 até 2016, gerando 372 resultados, vale ressaltar que os termos foram buscados por tópico e foi utilizado essa estrutura de pesquisa em conjunto de termos, com finalidade de abranger o máximo de informações de pesquisa na base sobre o assunto nesse estudo.

Posteriormente, excluiu-se os tipos de documentos fornecidos pela base *Web of Science - Main Collection (Thomson Reuters Scientific)* que não interessavam para a pesquisa, como “proceeding papers” (109 documentos), “review” (25 documentos, onde pôde-se observar inicialmente algum tópico do estudo relacionado a EmA, mas que numa análise mais aprofundada de conteúdo destes trabalhos observou-se não haver relação com o tema desta pesquisa, a indústria da construção civil), “correction” (1 documento) e “editorial material” (2 documentos), resultando em 235 documentos tipo artigo. Após essa etapa, também se excluiu as áreas de pesquisa na base, as quais não estavam no escopo do trabalho, como: agricultura (16), matemática (6), biotecnologia aplicada a microbiologia (4), biologia marinha (3), geografia física (2), química (2), medicina experimental de pesquisa (1),

oceanografia (1), geografia (1), tecnologia das ciências ambientais (1), pesca (1), eletroquímica (1), demografia (1), ciências da computação (1) e bioquímica biologia molecular (1). Após essas etapas, restaram 201 artigos coletados na base *Web of Science - Main Collection (Thomson Reuters Scientific)* para análise.

Em seguida, foram realizadas as mesmas etapas na base de dados SCOPUS, com o objetivo de se obter mais artigos que abordem EmA na construção civil. É importante ressaltar que nessa base só é possível extrair trabalhos a partir do ano de 1960. A pesquisa foi iniciada pela busca do tipo de documento artigo, logo, sendo encontrados 340 artigos. Posteriormente foram excluídas as áreas fora do escopo da pesquisa, como agricultura, ciências sociais, matemática, química, engenharia química, medicina, imunologia, física e astronomia, bioquímica genética e biologia molecular, veterinária, farmacologia, taxonomia, ciências da computação e ciências planetárias, restando assim 145 artigos.

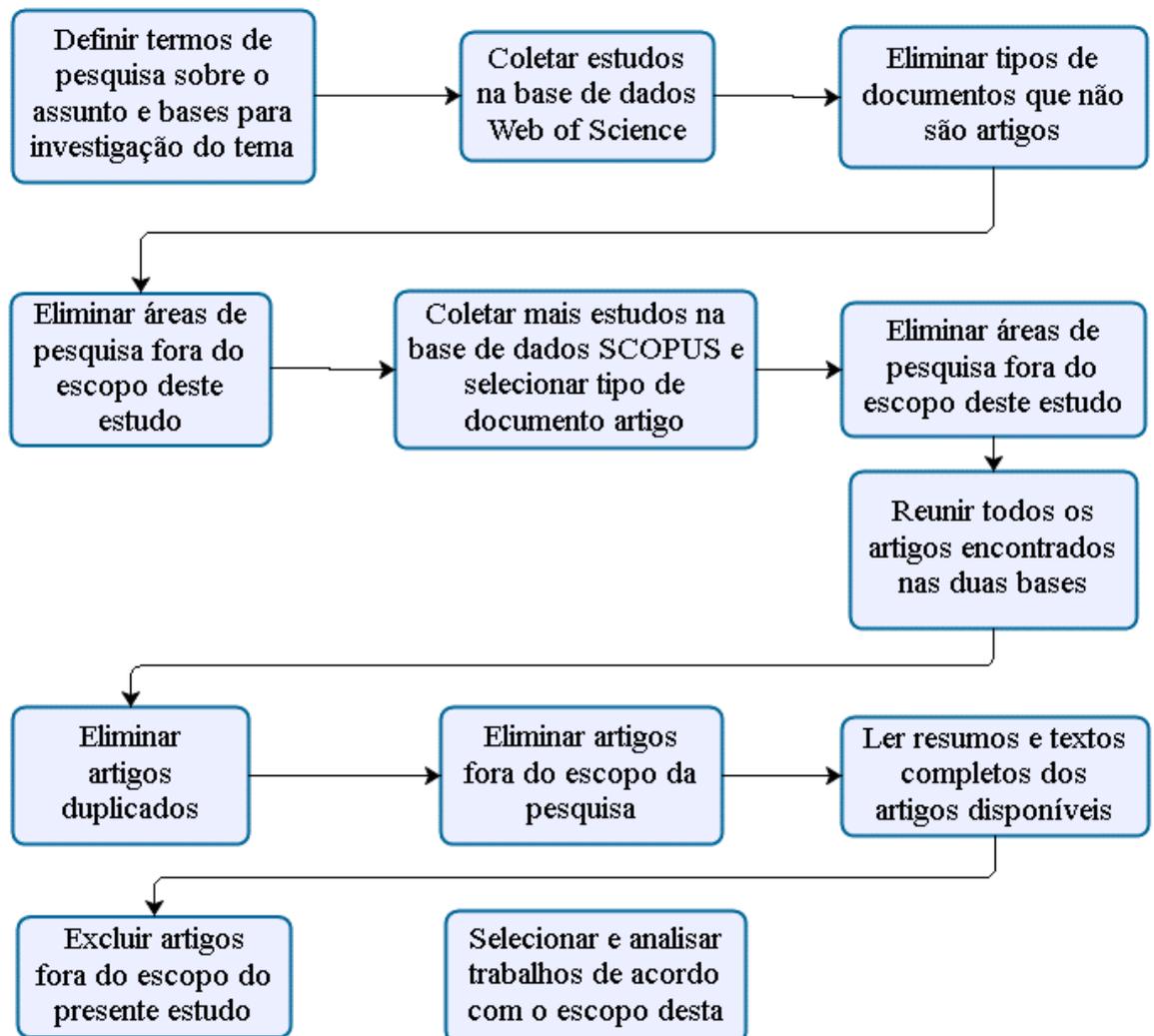
Como se trabalhou com duas bases de dados, a etapa seguinte foi realizar a exclusão dos trabalhos redundantes (mesmo artigo presente simultaneamente nas duas bases), permanecendo 243 de um total de 346 trabalhos. A etapa seguinte consistiu em se identificar artigos não disponíveis de forma completa na base Periódicos Capes, sendo os mesmos excluídos. A partir da leitura dos resumos/abstracts ficou constatado que outros artigos foram eliminados pelo fato de estarem fora do escopo desta pesquisa, restando assim 63 trabalhos.

Por fim, com os artigos coletados e por meio da leitura do texto completo de cada estudo, foi possível definir o número final de artigos considerados dentro do escopo da pesquisa. 34 trabalhos foram excluídos, resultando numa amostra final de 29 artigos para análise e extração das informações.

Vale ressaltar que não foi utilizado a sigla EmA na busca inicial dos artigos, visto que em um teste realizado anteriormente apenas a sigla levava para muitos artigos em outras áreas que não era de interesse para esta pesquisa, como por exemplo, a área de saúde e computação.

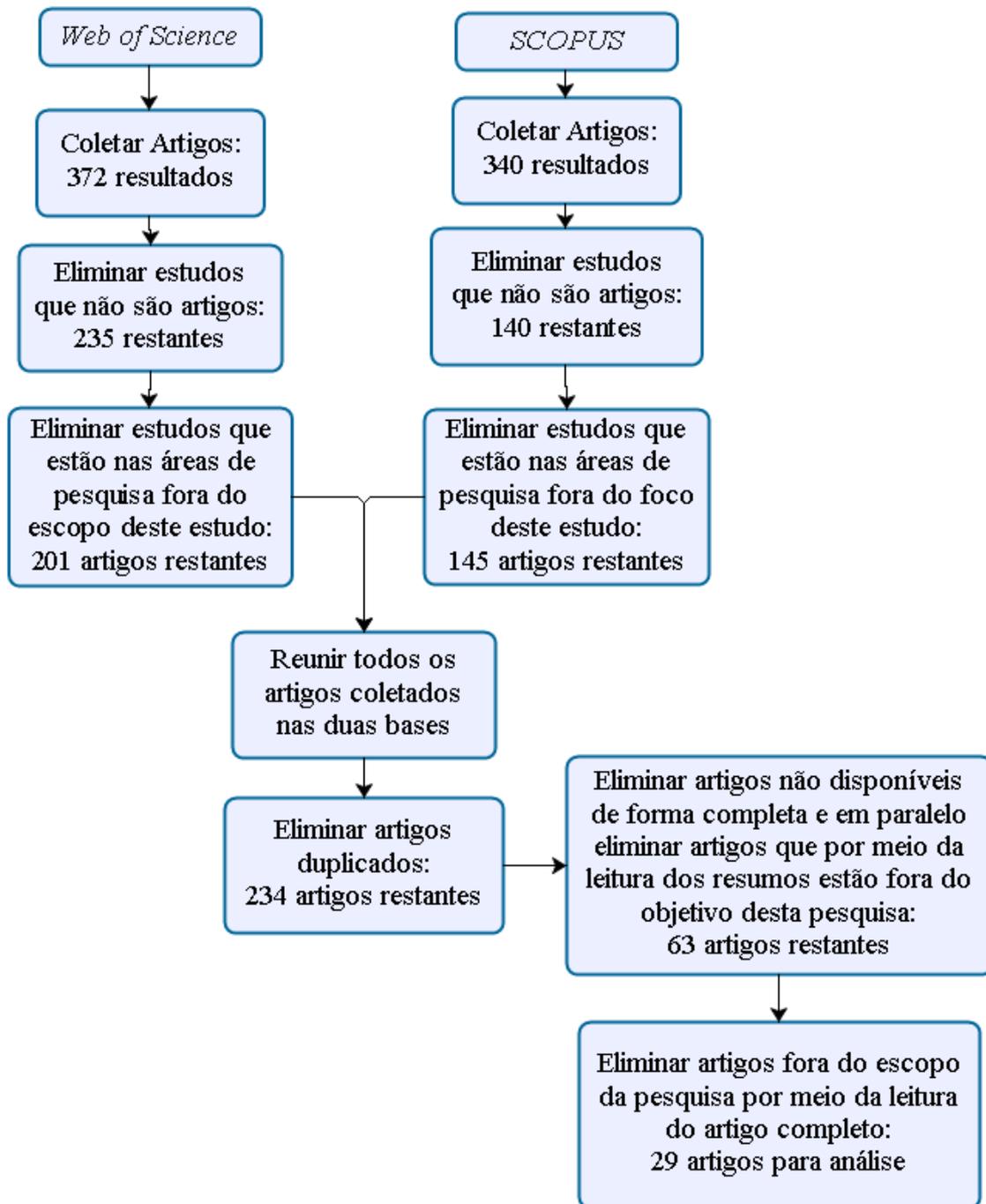
Após a definição dos critérios de exclusão e inclusão, foi elaborado um roteiro com finalidade de expor o número de trabalhos identificados em cada estágio, resultando em um total de 29 artigos a serem analisados (Figura 2).

Figura 1- Fluxograma Padrão para realizar uma RSL para este estudo



Fonte: A Autora (2017)

Figura 2- Fluxograma do Processo de Seleção dos Artigos



Fonte: A Autora (2017)

2.2 Considerações Finais sobre o Capítulo

De acordo com a pesquisa realizada, foi possível concluir que a revisão sistemática da literatura (SLR) proporciona uma pesquisa estruturada que facilita o entendimento de como a pesquisa foi desenvolvida, contribuindo para que outros pesquisadores que venham a ter interesse sobre o tema possam reproduzir o trabalho e obter os mesmos resultados, como também orientá-los para uma possível ampliação dessa pesquisa.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica utilizada para este trabalho contempla: Sustentabilidade, Sustentabilidade na Indústria da Construção Civil, Ferramentas Aplicadas à Sustentabilidade e à Indústria da Construção Civil, *Emergy Analysis* e os principais conceitos associados ao EmA, como, Linha de Base Global, transformidade, diagrama e indicadores mais comuns para utilização desta ferramenta.

3.1 Sustentabilidade

De acordo com Lien et al. (2007), sustentabilidade é definida pela capacidade de um sistema manter sua produtividade e integridade, mesmo quando submetido a algum desequilíbrio ambiental.

A Comissão Brundtland (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1987, p 8.), afirma que sustentabilidade é o desenvolvimento do meio ambiente, satisfazendo e atendendo as necessidades do presente sem comprometer a capacidade dos recursos para as gerações futuras (Carter & Rogers, 2008).

Para pesquisadores, governos e estudiosos, o tema tem se tornado relevante, sendo inserido de forma expansiva na legislação por meio da responsabilidade ambiental nas organizações (Milne & Gray, 2013). Little et al., 2016 afirmam que sustentabilidade expressa um conceito o qual assegura o futuro da humanidade e da integridade de recursos e de ecossistemas dos quais dependemos.

Na literatura distintas definições sobre sustentabilidade são formuladas, porém os conceitos sobre o tema são similares e encontrados de forma holística em diversos estudos.

3.2 Sustentabilidade na Indústria da Construção Civil

A indústria da construção civil é responsável pela exploração de aproximadamente 40% dos recursos naturais, ocasionando impactos ambientais, como o consumo de energia, remoção do solo, emissões de gases do efeito estufa, geração de resíduos sólidos e alteração nos ecossistemas (Mateus et al., 2013).

Alencar et al. (2017) destacam que estes consumos elevados de recursos naturais pela indústria da construção civil despertam atualmente a necessidade de se propor novas formas de se planejar, projetar e executar edificações, buscando alternativas economicamente viáveis associadas a racionalização do uso destes recursos.

Para Pulselli et al. (2007) realizar uma política ambiental na indústria de construção é

fundamental, pois tem finalidade de assegurar a qualidade do ambiente, otimizando o uso de recursos, realizando assim um controle e gestão de todo sistema a longo prazo.

Segundo Luo *et al.* (2015) é preciso minimizar o impacto ambiental e utilizar os recursos naturais de forma sustentável e eficiente até mesmo na fase de concepção de um projeto de construção, com finalidade de conservar os recursos, visando melhorar o desempenho do produto final.

Segunda a literatura, a necessidade de economizar recursos tanto energéticos como de materiais tornou-se uma preocupação global, com objetivo de reduzir os componentes da construção civil, realizando o desenvolvimento sustentável, preservação ao meio ambiente, gerando produtos de qualidade e consequentemente reduzindo custos da organização.

A crescente consciência do desempenho ambiental da construção de produtos, como edifícios desperta a necessidade de ferramentas capazes de avaliar a sustentabilidade (Haapio & Viitaniemi, 2008; Saad *et al.*, 2011; Malmqvist & Glaumann, 2009) e fornecer informações quantitativas e qualitativas para certificações.

3.3 Ferramentas Aplicadas à Sustentabilidade e à Indústria da Construção Civil

Ao longo dos últimos 30 anos, vários métodos têm sido propostos para avaliar as características ambientais e econômicas de diferentes sistemas ou processos. Nesse âmbito, essas ferramentas auxiliam a avaliar e melhorar a sustentabilidade em qualquer processo, fornecendo uma visão abrangente por meio de informações necessárias com finalidade de validar se determinados processos são sustentáveis a curto ou longo prazo, como por exemplo, Life Cycle Assessment (Duan *et al.*, 2009; Louseau *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2016); Exergy Analysis (Cleveland *et al.*, 2000; Sciubba & Ulgiati, 2005); (Bastianoni *et al.*, 2007); avaliação de risco ambiental (Russel, 1999; Palme *et al.*, 2005); Emergy Analysis (Odum, 1996; Ulgiati & Brown, 1998; Geng *et al.*, 2010).

De acordo com a literatura essas ferramentas estão sendo estudadas e aplicadas em diversos contextos, com objetivo de assegurar a sustentabilidade por meio de avaliações e informações dos impactos ambientais em projetos independente da área de atuação. Este trabalho apresentará uma pesquisa específica, baseada no Emergy Analysis (EmA).

3.4 Emergy Analysis

EmA pode ser definida como energia solar disponível de forma direta e indireta, para avaliar a sustentabilidade de um serviço ou produto em qualquer processo, a qual pode ser aplicada em várias escalas que variam de locais específicos, regiões e países. Os primeiros

trabalhos associados a esta abordagem foram desenvolvidos por Odum em 1980. Também Odum reconheceu os princípios da qualidade de energia dos ecossistemas encontrados na natureza e nos seres humano, o qual classificou e adotou valores de referências de cada recurso por meio dos princípios da termodinâmica. (Odum, 1996).

EmA considera entradas diferentes, incluindo a energia proveniente de fontes renováveis, fontes não renováveis e materiais envolvidos em um processo, na mesma base física, isto é, na base de energia solar, proposta por Odum, com finalidade de deixar todos os recursos na mesma unidade base e assim executar as análises desejadas (Ulgiati et al., 1994). Kang & Park (2002), mencionam que aplicando o conceito de EmA para um sistema composto de sociedade e natureza, espera-se que a energia e gestão de recursos maximizem a economia, eficácia de processos, inovações e adaptações ao ambiente e mudanças sociais. Para Brown & Buranakarn (2003), EmA representa a energia total consumida nos processos de trabalho ambiental para produzir um produto ou serviço em grandeza de energia.

De acordo com Rugani & Benetto (2012) EmA está sendo cada vez mais estudada e tende a ser uma ferramenta promissora para medir o desempenho ambiental e elaborar políticas públicas adequadas em distintos contextos: sistemas agrícolas (Zhang et al., 2007 e Nakajima & Ortega, 2015); sistemas urbanos (Chen et al., 2011 e Lei et al., 2016); sistemas industriais (Geng et al., 2010). EmA também é aplicada no tratamentos de resíduos (Song et al., 2013 e Winfrey et al., 2015) e na produção de cimento (Brown & Buranakarn, 2003 e Pulselli et al., 2008).

Segundo Ulgiati & Brown (2009), o conceito de energia utiliza a base termodinâmica de todas as formas de energia e de materiais (medida pelo seu teor de calor, massa ou energia, ou seja, a energia disponível de cada fluxo em relação ao ambiente), convertendo esses recursos em equivalentes de uma forma de energia, geralmente luz solar.

Srinivasan et al. (2011) afirmam que essa ferramenta é considerada completa para prática de construções sustentáveis. EmA está sendo utilizado na área de engenharia, pois fornece informações integradas com os impactos causados no meio ambiente, em conjunto com as técnicas de otimização e pode oferecer soluções para maior eficiência energética ao longo dos anos para uma construção e poucos estudos foram realizado nesse contexto (LUO ET AL., 2015).

3.5 Principais Conceitos Associados ao EmA

Para melhor compreensão deste estudo, uma breve descrição dos princípios básicos associados a metodologia analisada será apresentada.

3.5.1 Linha de Base Global

Durante muitos anos, pesquisadores buscavam calcular um índice que representasse as três fontes principais de energia (solar, gravitacional e geotérmica) da camada da superfície terrestre. Surgiu assim, o estudo de Odum em 1996, que calculou o índice que representa as três forças motrizes da Terra, com objetivo de deixar os elementos que se deseja analisar em uma mesma base de medida, conhecida como linha de base global (Liu et al., 2015).

Para Brown et al. (2016), a camada da superfície da terra onde acontece os processos vitais é conhecida como geobiosfera, a qual é impulsionada por três fontes de energia, que de maneira integrada constitui a linha de base em energia da geobiosfera (GEB) que é expressa em exergia solar, cuja abreviatura é seJ. Sabe-se que essas entradas de energia se encontram de maneira distinta, por isso é necessário que suas unidades se encontrem na mesma unidade comum, ou seja, em unidades equivalentes de exergia solar.

De acordo com a literatura, a linha de base global de energia é em resumo uma referência para os principais processos na escala da biosfera, cujo esse valor foi calculado de acordo com o pressuposto da radiação solar, o qual equivale a 1 seJ/J, os demais processos são calculados de acordo com a proporção dos fluxos de entrada em um sistema. Nas primeiras concepções da teoria, Odum em 1971 considerou a energia solar como base para todas as outras formas de energia, estimando 1000 joules de luz solar para produzir 1 Joule de matéria orgânica e cerca de $4,2 \times 10^6$ joules de energia solar para produzir \$ 1 de serviço humano. No ano de 1983 seu estudo se tornou mais robusto, estimando a fonte de calor geológico da terra, em seguida, por meio do livro *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*, Odum (1996) adicionou a energia das marés em base global de energia solar, resultando numa linha de base de $9,44 \times 10^{24}$ seJ/ ano. Desde 2000, pesquisadores propõem diferentes linhas de base, fornecendo mais alternativas para serem inseridas e analisadas em estudos, como por exemplo a linha de base global de $9,44 \times 10^{24}$ seJ/ano, pois foram utilizados equações matemáticas diferentes daquele proposto por Odum em 1996.

Em 2000 surgiu o primeiro manual de energia, o qual utilizou um método de equações simultâneas para calcular a equivalência de energia solar, geotérmica e das marés que produziu a linha de base global mais atual de $15,83 \times 10^{24}$ seJ/ano (Brown et al., 2016). Por meio dos métodos encontrados neste manual, várias linhas de base têm sido propostas, variando de $9,26 \times 10^{24}$ a $15,83 \times 10^{24}$ seJ/ano, como observado nos trabalhos de (Campbell, 2000); (Campbell et al, 2005); Brown & Ulgiati (2010).

3.5.2 Transformidade

Como apresentado anteriormente, EmA considera entradas diferentes, incluindo a energia proveniente de fontes renováveis, fontes não renováveis e materiais envolvidos em um processo, na mesma base física, isto é, na base de energia solar, proposta por Odum, com finalidade de deixar todos os recursos na mesma unidade base e assim executar as análises desejadas (Bastianoni & Marchettini, 1996).

Para Brown & Buranakarn (2003), a proporção de energia necessária para fazer um produto é chamado transformidade. A energia solar é expressa pela unidade joules solar (sej), enquanto a transformação solar, é uma proporção de energia joules solar por joule do fluxo de saída (sej/ J). A transformação dos principais fluxos naturais da biosfera (vento, chuva, mar, correntes, ciclos geológicos, etc.) são calculados pela razão do total de condução de energia da biosfera como um todo para a energia real do fluxo.

De acordo com Martin et al. (2006) transformidade pode ser considerada uma medida de qualidade ótima, com as melhores condições ambientais. O conceito transformidade é capaz de analisar uma indicação na concentração de entradas no sistema em tempo, espaço e energia necessária para transformar as entradas do processo em um determinado sistema (Rydberg & Haden, 2006).

Para Brown et al. (2016) transformidade, é a proporção de exergia solar, definida como a energia solar requerida diretamente e indiretamente para produzir 1 Joule de saída a partir de um processo, e as suas unidades são sej/J.

3.5.3 Construção do Diagrama

De acordo com Rydberg & Jansén (2002), o método EMA é capaz de produzir um diagrama ecológico, o qual representa visualmente as entradas de energia relativas para diferentes fontes de energia.

Segundo Baral et al. (2016), EMA é todo diagrama, que expõe a contribuição relativa de cada entrada em Joules em torno da biosfera, o qual inclui todos os insumos diretos, indiretos e naturais, para análise da sustentabilidade a longo prazo, devido a sua capacidade de estimar de forma holística o impacto ambiental.

Para realizar a primeira etapa da aplicação da metodologia de energia é necessário a construção de um diagrama, classificando todos os componentes em renovável ou não renovável, recursos externos e internos. O diagrama de um sistema é desenhado usando os símbolos da linguagem de energia dos sistemas ecológicos para representar graficamente os

componentes do sistema, fontes de energia e fluxos (apêndice 1). Os componentes e subsistemas são conectados com as setas que indicam os fluxos de energia, matérias-primas e informação (Odum, 1996). De acordo com Liang et al. (2016) os indicadores de energia são utilizados para avaliar processos, que de forma tradicional podem ser divididos em:

- Renováveis
- Não renováveis
- Recursos adquiridos

Recursos adquiridos também podem ser divididos em duas categorias:

- Entrada renovável comprada/adquirida
- Saída adquirida não renovável

A segunda etapa, é construir uma tabela com os principais itens que se deseja avaliar, esses insumos geralmente estão em unidades diferentes, como por exemplo, volume, peso linear, densidade dos materiais de construção, quantidade dos recursos, então é necessário colocar todos os insumos na mesma unidade, pois quando todos os elementos estiverem em uma unidade comum, será possível calcular a energia. Em seguida, deve-se multiplicar cada valor dos insumos inseridos por sua transformidade específica, obtendo assim o valor de energia de cada recurso, e finalmente a sustentabilidade do sistema pode ser avaliada (Yang et al., 2010).

3.5.4 Indicadores baseados em Energia

A metodologia EmA apresenta indicadores quantitativos que avaliam a sustentabilidade e de acordo com Zhang et al., (2017) foi possível identificar os principais indicadores encontrados em diversos estudos na literatura.

- Percentagem de capacidade de renovação (% R): É a razão entre o total de energia dos produtos renováveis e a quantidade total de energia do processo. É importante destacar que, quanto maior a razão, mais sustentável o sistema em estudo.

- Valor de Unidade de energia (UEV): Este indicador nada mais é que a transformidade de cada produto no processo, ou seja, é a energia solar definida para cada item do processo. Este indicador é inversamente relacionado com a eficiência de um sistema de produção (Brown et al., 2012).

- Razão de rendimentos de energia (EYR): É a razão entre a energia total exigida, dividida pela energia de produtos e serviços adquiridos. Vale ressaltar que este indicador mede a capacidade de concorrência e benefício econômico de um processo industrial (Brown & Ulgiati, 2002). Quanto maior o valor de EYR, mais forte a capacidade de concorrência, que

significa o melhor benefício econômico do processo industrial. E isso também mostra o menor custo deste sistema, devido aos insumos adquiridos ter valor inferior. Vale ressaltar que a razão de rendimento de energia (EYR) avalia o equilíbrio do fluxo e energia.

- Relação de Troca de Energia (EER): É a relação entre energia total dos produtos adquiridos e a energia monetária de cada produto. Esse indicador mede a taxa de custo benefício da energia de dos produtos adquiridos, é importante destacar que quando EER é maior que 1, significa que os recursos que foram adquiridos ganharam energia, já quando é inferior a 1, significa que os recursos irão perder energia e quando este indicador é igual a 1, expressa que a energia se manteve constante.

- Relação de Carga Ambiental (ELR): É um indicador sensível a energia dos fluxos renováveis e não renováveis, apresenta o impacto ambiental em um sistema, para realizar o seu cálculo basta dividir a soma de energia não renovável e da energia adquirida pelo o total de energia renovável. De acordo com Cao & Feng (2007), quando este indicador apresenta um valor inferior a 2, significa que se tem uma baixa carga ambiental, para valores maiores que 10, uma alta carga ambiental e quando o resultado estiver entre 3 e 10 a carga ambiental é considerada moderada.

- Índice de Sustentabilidade de Energia (ESI): É a proporção entre a EYR e ELR. Este indicador reflete a capacidade de um sistema elaborar produtos e serviços com o máximo de lucro possível e um menor impacto ambiental. Segundo Cao & Fang (2007), quando ESI é menor que 1, significa que os sistemas não são sustentáveis a longo prazo, sistemas que estão entre 1 e 5, podem ter uma contribuição sustentável para a economia a médio prazo e sistemas com ESI maior que 5 podem ser considerados sustentáveis a longo prazo.

3.6 Considerações Finais sobre o Capítulo

Este capítulo apresentou temas e abordagens relevantes para o presente estudo, que posteriormente servirão de suporte ao longo desse trabalho em apresentações dos resultados e discussões. É importante ressaltar que muitas dessas definições podem divergir dependendo do autor e que o presente trabalho busca oferecer suporte ao leitor por meio de alguns conceitos sobre os assuntos estudados nesse capítulo.

4 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados uma breve descrição dos resultados e contribuições dos trabalhos encontrados na literatura, os quais auxiliaram o desenvolvimento da presente pesquisa no contexto da indústria de construção.

4.2 Aplicação do EmA na Indústria da Construção

De acordo com Luo et al. (2015) o primeiro trabalho que aplicou EmA no setor de construção foi publicado por Meillaud et al. (2005), avaliando a sustentabilidade de um edifício já construído de acordo com as normas ambientais no campus universitário na Suíça, onde alunos de graduação, pós graduação e professores representaram os recursos de entrada no sistema. Também é importante destacar a utilização das transformidades para cada recurso, por exemplo, foi estabelecido que a transformidade de um aluno que concluiu os estudos na instituição é de $2,48 \times 10^8$ seJ/J (cerca de 3 vezes maior do que quando o mesmo entrou na instituição), logo, representando o conhecimento adquirido durante os anos que permaneceu na universidade. Como saídas, considerou os estudantes que concluíram os cursos e publicações feitas. Outra contribuição realizada neste estudo foi o cálculo da energia de alguns materiais de construção comuns, como por exemplo, aço, madeira, gesso, vidro, alumínio, papel, borracha, polietileno na fase de manutenção do edifício, determinando a energia total de cada material, assim apresentou que o papel teve a maior entrada de material com $5,7 \times 10^{15}$ seJ/ano, o estudo também comparou e calculou a energia por calor e por eletricidade para o sistema, onde a energia de maior entrada foi a de eletricidade ($2,7 \times 10^{16}$ sej / ano) e para finalizar o artigo também discute as vantagens e desvantagens do método em relação a metodologias convencionais, como exergia e análise do ciclo de vida.

Alguns autores investigaram a metodologia EmA para o sistema de *building envelope*, ou seja, elementos que fazem parte de uma edificação, os quais separam o seu interior do ambiente externo, como por exemplo, janelas, paredes, fundações, telhado e que tenham um impacto significativo no desempenho energético do componente quando substituído ou reabilitado, a fim de alcançar níveis ideias de rentabilidade. É o caso do estudo encontrado pelos autores Pulselli et al. (2009) que aplicaram a metodologia EmA com finalidade de avaliar e comparar três sistemas *building envelope* (com diferenças de temperatura, em diferentes localidades geográficas, Berlim no norte da Europa, Barcelona na Costa

mediterrânea e Palermo no sul da Itália). Como resultado, o trabalho validou que o sistema de *building envelope* depende de tecnologias relativas às condições climáticas externas.

Já Srinivasan et al. (2011) em seu trabalho utilizaram EmA para desenvolver um método que identifique solução ideal para um sistema *building envelope*, de modo que esse sistema atinja seu potencial máximo com os fatores que estão relacionados ao aquecimento e resfriamento, o método proposto auxilia na seleção de materiais e projetos de *building envelope* com base no impacto ambiental total para um projeto de construção.

Yi et al. (2017) avaliaram a sustentabilidade por meio de índices ecológicos fornecidos pela teoria EmA em um edifício considerado *energy building*, os quais possuem consumo zero de energia, ou seja, a quantidade total de energia utilizada é aproximadamente igual a quantidade de energia renovável produzida no local ou aproximadamente igual a energia adquiridas de outras fontes renováveis em uma base anual. Os resultados apresentados neste estudo, mostraram que o edifício *energy building* usa maior energia não renovável para buscar um orçamento zero de energia mesmo com o maior índice de sustentabilidade. Outra contribuição deste estudo, foi o aumento do uso de insumos ambientais para a produção de energia renovável e para finalizar, este trabalho demonstrou que a construção sustentável tende a depender de pesquisas na área.

Outros autores desenvolveram artigos sobre a produção de alguns materiais da indústria da construção, como Pulselli et al. (2008) consideraram as atividades do processo de produção do cimento, transporte de materiais e mistura do concreto realizando o cálculo pelo EmA, que foi possível comparar a energia do concreto e cimento, identificando que o material cimento possui maior necessidade de energia. Outra análise neste estudo foi em relação ao investimento, apresentando um indicador artificial em relação a sustentabilidade, que apresentou capacidade competitiva fraca, devido a sensibilidade em relação ao mercado na área.

Pan et al. (2016) analisaram empresas de produção de aço na China por meio do EmA, que em seu trabalho integrou o método DALY e o modelo de *Potentially Disappeared Fraction* (PDF) para quantificar o impacto das emissões. Posteriormente, indicadores relacionados ao processo de produção industrial foram apresentados. Os resultados da pesquisa mostraram que esta empresa localizada na província de Sichuan não é sustentável a longo prazo, devido à grande parcela de insumos não renováveis e forte dependência de insumos importados, também o trabalho fornece propostas para melhorar o desempenho desta empresa. Segundo os autores, os métodos propostos e o sistema de indicadores podem atuar como uma das ferramentas úteis para a tomada de decisões na indústria de aço e ferro.

No estudo de Chen et al. (2016) foi avaliado a sustentabilidade da produção de cimento na China, que utilizou-se EmA baseado no inventário de ciclo de vida (LCI). Outra contribuição encontrada no trabalho de Chen foi a utilização da análise de incerteza, com finalidade melhorar a precisão dos resultados. Foi calculado a energia do material cimento e também concluiu-se que os principais componentes para sua produção de cimento foi o calcário, carvão e eletricidade. Por meio dos indicadores analisados neste estudo, a indústria de cimento na China não é sustentável, levando um alto índice de carga ambiental. Além disso, os resultados propõem ajustar a estrutura industrial, melhorar a eficiência energética e aplicar alternativas para substituir as matérias primas de forma que assegure a sustentabilidade.

No estudo de Zhang et al. (2017) por meio de indicadores ambientais foi possível constatar que o carvão tinha um impacto significativo para a produção de cimento na China no ano de 2010, como também validou que indústrias chinesas de cimento não eram sustentáveis a longo prazo. Logo, este estudo apresentou alternativas para a produção deste material afim de reduzir seu impacto no meio ambiente e sociedade.

Também foi possível encontrar na literatura trabalhos que apresentem comparações entre edificações, identificação de equações para otimizar o sistema estudado, sempre com o objetivo de avaliar o impacto ambiental.

No estudo de Li et al. (2011) apresentou uma avaliação e comparação da eco eficiência de construção de seis edifícios residenciais em duas cidades chinesas (Pequim e Xanguai) por meio do EmA. Os edifícios possuem característica de altura baixa, alturas de médio porte e arranha céus, o resultado deste estudo forneceu alternativas para avaliar o impacto ambiental e para assim aumentar a eco eficiência de construção de edifícios.

Yi et al. (2015) avaliaram as consequências de decisões iniciais, como por exemplo, geometria, tipos de materiais, paredes, janelas, em uma construção com características de prédio de escritórios, integrando EmA com Modelo *Building Simulation Energy* (BES), o qual usa a ferramenta Energy Plus para analisar a energia de construção, Modelo *Building Energy Analysis* (BEMA), que utiliza métodos analíticos para estimar quantidades emergentes de componentes e Modelo *MetaModel Development* (MMD), que emprega o método Taguchi para desenvolver um modelo mais rápido e eficiente de simulação. Esses métodos têm com objetivo de otimizar o sistema. Por meio deste estudo, verificou-se que modelo desenvolvido com o método Taguchi-ANOVA para a construção de otimização nas decisões dos projetos foi validado com resultados de testes analíticos para acelerar a tomada de decisão em relação ao impacto ambiental. Este estudo também demonstrou a possibilidade

de aplicações mais amplas para a síntese de energia visando a simulação de projetos com referências ambientais.

Yi & Braham (2015) quantificaram o EmA no contexto da construção de um edifício localizado na Pensilvânia (EUA), onde, a partir da coleta de dados dos materiais disponíveis na literatura, foi realizada uma integração com dois métodos de análise de incerteza: simulação de Monte Carlo (MCS) e lógica *Fuzzy*. O estudo assumiu dois pressupostos: (1) Distribuições empíricas de todos os parâmetros se encaixam na distribuição normal e (2) A lógica Fuzzy foi empregada para estimar distribuições de valores, devido a julgamentos subjetivos. Simulações foram conduzidas e foi possível fazer a comparação por meio do teste KS (Kolmogorov Smirnov). Logo em seguida, foi realizada a análise de sensibilidade. Como resultado, tornou-se claro que os valores emergentes específicos dos grandes insumos como eletricidade e bloco de concreto são as variáveis mais influentes para a construção.

Andrić et al. (2017) destacaram em seu estudo o interesse de substituição em sistema do edifício localizado em uma cidade na Sérvia, justificando a necessidade de melhorar o desempenho ambiental, identificando os processos que causam estresse significativo no meio ambiente, por meio da avaliação de energia em todas as fases e processos no sistema estudado. Os resultados revelaram que 68% da energia é provocada durante a fase de operação de edifício, 24% durante a fase de construção e apenas 8% durante a fase de fim de vida. Outra contribuição apresentada no trabalho foi a validação da substituição do sistema atual, o que trouxe benefícios do ponto de vista ambiental. O uso de materiais e recursos para realizar a atividade de substituição não foram consideradas como um impacto negativo sobre o edifício em seu desempenho ambiental.

Na literatura diversos trabalhos abordaram os impactos ambientais ocasionados por determinadas construções no ambiente. O trabalho de Fang et al. (2015) analisou o impacto ambiental da construção de uma barragem com base no EmA. Neste estudo também foi estabelecido indicadores baseados no impacto da infraestrutura construída no ecossistema. Os resultados indicaram que a construção de barragens forneceu serviços de auxílio à sociedade, porém efeitos negativos no ecossistema como um todo foram observados.

Liu et al. (2015) analisaram o tratamento do lodo de esgoto e transporte para a produção de clínquer por meio do EmA. Outra análise neste estudo, foi que os valores da energia do cimento foram comparados com trabalhos anteriores, com o objetivo de destacar a sensibilidade do EmA em relação a contextos e a fronteira do sistema. O estudo de Akhtar et al. (2015) teve como objetivo avaliar e comparar materiais padrões (PVC, concreto, ferro fundido e argila) utilizados em tubos de esgoto, identificando soluções sustentáveis.

No trabalho de Luo et *al.* (2015) os impactos ambientais decorrentes das opções de energia são divididos em quatro categorias: esgotamento dos recursos naturais, o efeito estufa (referente ao dióxido de carbono), o efeito da chuva química (referente ao dióxido de enxofre) e a liberação de calor, em sistemas de aquecimento, ventilação e refrigeração utilizando o EmA. Os resultados mostraram que o método de geração de energia por eletricidade foi o fator mais importante para determinar o desempenho ambiental, fazendo com que projetistas e clientes consigam selecionar qual o sistema atenderá suas necessidades.

4.3 Considerações Finais sobre o Capítulo

Apesar do número restrito de trabalhos publicados sobre EmA na indústria de construção, este capítulo expôs uma revisão da literatura por meio das principais contribuições e aplicações dos autores sobre a temática abordada encontrada em estudos relevantes da área.

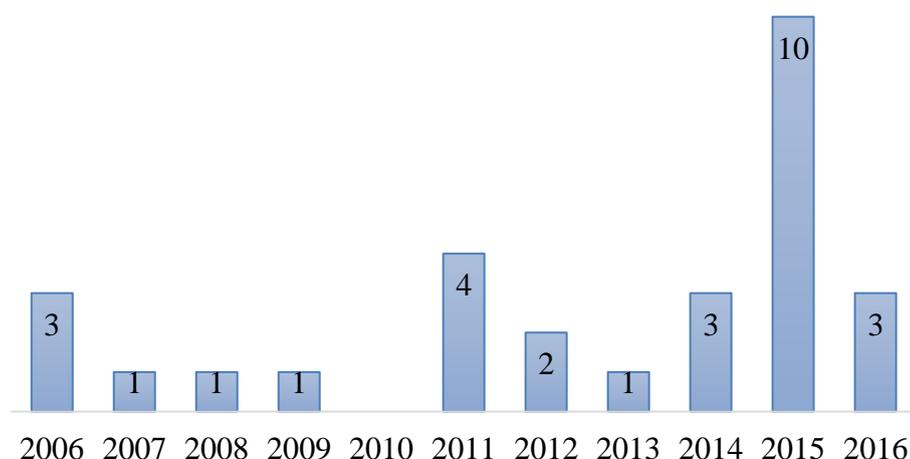
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA RSL E DISCUSSÕES

A partir do presente estudo algumas análises foram realizadas com base nos artigos coletados nas duas bases de dados *Web of Science*® e *SCOPUS*, no período de 1980 até 2016, foram selecionados 29 trabalhos para uma análise mais detalhada, expondo as características gerais dos estudos encontrados na literatura com finalidade de identificar a relevância do tema EmA na indústria da construção civil.

5.1 Frequência do número de publicações dos artigos por ano

Diante de todos os critérios utilizados para a realização da RSL, foi possível identificar a evolução dos trabalhos publicados na área. Apesar do método ter sido estabelecido em 1996 por Odum, os primeiros artigos foram publicados apenas em 2006. Por meio da figura 5, foi possível identificar que de 2006 até 2010 foram publicados apenas seis trabalhos. Vale ressaltar, que esses estudos foram encontrados nas duas bases de dados analisadas. No ano de 2010 não se teve nenhum registro de artigo publicado, porém no período de 2011 até 2016 observa-se uma maior concentração de artigos, com o total de 23 trabalhos. É importante destacar que o ano de 2015 representou 34% dos trabalhos encontrados na literatura neste período de análise.

Figura 3- Número de Artigos Publicados por Ano



Fonte: A Autora (2017)

5.2 Frequência dos Estudos por Periódicos

O conjunto dos estudos analisados se distribui em 19 periódicos diferentes conforme a tabela 1, sendo possível observar que 59% estão localizados nos 7 primeiros periódicos, cada um com pelo menos 2 publicações. Nesta análise também são apresentados os fatores de impacto de cada periódico. Os periódicos *Journal of Cleaner Production*, *Building and Environment* e *Ecological Indicators* registraram individualmente 3 publicações cada. Já os periódicos *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, *Energy and Buildings*, *Ecological Modelling* e *Ecological Engineering* publicaram 2 estudos cada e 12 periódicos tiveram somente um artigo publicado.

Tabela 1 - Frequência dos Estudos por Periódicos

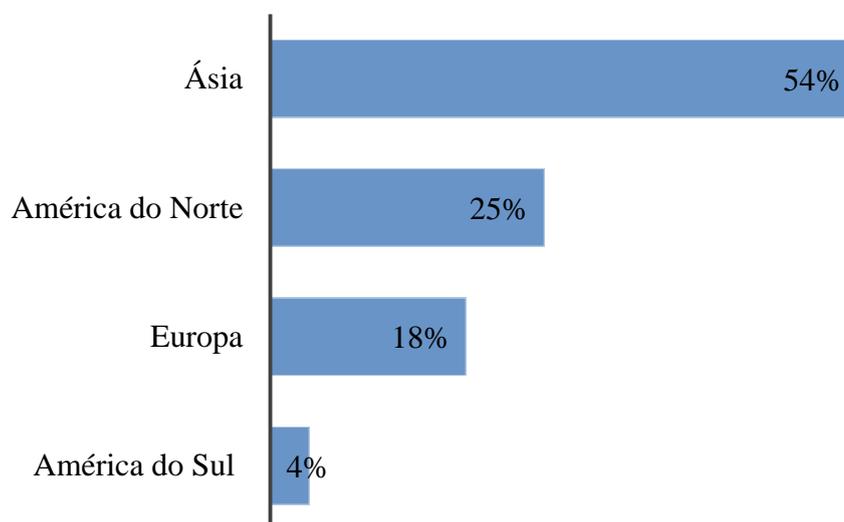
Periódicos	Publicações	%	Fator de impacto	Fator de impacto de 5 anos	Referências
<i>Journal of Cleaner Production</i>	3	10	5,715	6,207	Liu et al. (2015); Chen et al. (2016); Pan et al. (2016)
<i>Building and Environment</i>	3	10	4,053	4,464	Srinivasan et al. (2012); Yi et al. (2015); Yi & Braham (2015)
<i>Ecological Indicators</i>	3	10	3,898	4,254	Pulselli et al. (2008); Li et al. (2011); Shao et al. (2013)
<i>WIT Transactions on Ecology and the Environment</i>	2	7	-	-	Pulselli et al. (2006); Pulselli et al. (2006)
<i>Energy and Buildings</i>	2	7	4,067	4,599	Pulselli et al. (2007); Rothrock (2014)
<i>Ecological Modelling</i>	2	7	2,363	2,683	Siracusa & La Rosa (2006); Shao et al. (2013)
<i>Ecological Engineering</i>	2	7	2,914	3,422	Arias & Brown (2009); Chen et al. (2011)
<i>Waste Management</i>	1	3,5	4,030	4,669	Yuan et al. (2011)
<i>River Research and Applications</i>	1	3,5	-	-	Cui et al. (2011)
<i>Ecological Informatics</i>	1	3,5	2,020	2,290	Gao et al. (2012)
<i>Frontiers of Earth Science</i>	1	3,5	1,051	-	Meng et al. (2014)
<i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>	1	3,5	3,331	-	Akhtar et al. (2015)
<i>International Journal of Life Cycle Assessment</i>	1	3,5	3,173	-	Saad et al. (2011)
<i>Energy Conversion and Management</i>	1	3,5	5,589	5,472	Luo et al. (2009)
<i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>	1	3,5	8,050	9,122	Fang et al. (2015)
<i>Buildings</i>	1	3,5	-	-	Srinivasan et al. (2015)
<i>Mine Water and the Environment</i>	1	3,5	1,278	-	Winfrey et al. (2015)
<i>Energy Policy</i>	1	3,5	4,140	4,599	Zhang et al. (2010)
<i>Sustainable Cities and Society</i>	1	3,5	1,777	1,698	Morrison et al. (2016)

Fonte: A Autora (2017)

5.3 Porcentagem das Regiões que Aplicaram EmA

A partir dos artigos coletados, foi verificado os principais continentes, onde os pesquisadores aplicaram a metodologia EmA.

Figura 4- Porcentagem dos Continentes que aplicaram EmA



Fonte: A Autora (2017)

Pelas informações da figura 4, observou-se que a maior quantidade de estudos sobre EmA se encontra no continente asiático (54%), sendo importante evidenciar a China como o país de maior aplicação com 15 estudos publicados, que apresentaram artigos sobre infraestrutura e edificações como o caso de estudos encontrados em Fang et al., 2015; Liu et al., 2015; Luo et al., 2015; Li et al., 2011. Na América do Norte tem-se 25% de aplicação, totalizando 7 trabalhos nos EUA, os quais podem ser encontrados em Sirivasan et al. (2011), Yi et al. (2015), Winfrey et al. (2015). As demais aplicações nos estudos coletados encontram-se na Europa (18%) e América do Sul (4%). Outro aspecto que se pode destacar é que no continente africano e na oceania, não foi realizado nenhum estudo na área.

5.4 Etapa da Obra

Por meio dos artigos selecionados a pesquisa identificou as fases que se encontravam as obras, foi possível classificá-las, identificando as referências utilizadas (tabela 2).

Tabela 2 - Etapa da Obra considerada em cada estudo na Aplicação do EmA

Etapa da Obra	Quantidade de Estudos	%	Referências
Construção	13	45	Fang et al. (2015); Sirivasan et al. (2015); Yi et al. (2015); Pang et al. (2015); Winfrey et al. (2015); Rothrock (2014); Shao et al. (2013); Gao et al. (2012); Baoshan et al. (2011); Li et al. (2011); Chen et al. (2011); Arias & Brown (2009); Siracusa & La Rosa (2006)
Conclusão	7	24	Morrison et al. (2016); Liu et al. (2015); Luo et al. (2015); Akhtar et al. (2015); Pang et al. (2015); Shao et al. (2013); Meng et al. (2014)
Integradas (Construção; Uso e Ocupação; Manutenção)	4	13	Srinivasan et al. (2012); Pulselli et al. (2007); Pulselli et al. (2006); Pulselli et al. (2006)
Concepção	1	3	Yi et al. (2015)

Fonte: A Autora (2017)

Nota-se que a maioria dos trabalhos que abordam a construção civil e o EmA se encontram na fase de construção, representando 45% do total. Diante desta pesquisa, observa-se que isso pode ser justificado pela a gama de dados que essa metodologia necessita para ser feita, 24 % dos trabalhos foram realizados em construções já finalizadas, 13% dos estudos conseguiram integrar as três fases de uma construção (construção, uso e ocupação e manutenção) para aplicação da metodologia e apenas um estudo, representando 3% relatou a metodologia na fase de concepção.

É importante destacar que os trabalhos encontrados em Pulselli et al. (2008), Chen et al. (2016); Pan et al. (2016) aplicaram EmA para produção de material de construção, como cimento, aço e concreto. Já o trabalho de Yuan et al. (2011) abordou a metodologia em relação aos resíduos de construção e demolição.

5.5 Linha de Base Utilizada nos Estudos

Outra análise realizada diz respeito a linha de base utilizada em cada estudo. De acordo com a tabela 3, 52% dos trabalhos utilizou a linha de base $15,83 \times 10^{24}$, 27,5% dos trabalhos utilizaram a linha de base $9,44 \times 10^{24}$, seguido de apenas um trabalho, representando 3,5% utilizou 12×10^{24} e em 18% dos trabalhos não foi possível identificar a linha de base utilizada.

Tabela 3- Linha de Base utilizadas nos estudos que abordaram EmA

Valores Utilizados de Linha de Base	País de Aplicação	Referências
$15,83 \times 10^{24}$	Colômbia	Arias & Brown (2009); Akhtar <i>et al.</i> (2015);
	Canadá	Pang <i>et al.</i> (2015); Winfrey <i>et al.</i> (2015); Yi <i>et al.</i> (2015);
	China	Sirivasan <i>et al.</i> (2015); Pulselli <i>et al.</i> (2006);
	EUA	Pulselli <i>et al.</i> (2006); Pulselli <i>et al.</i> (2007);
	Itália	Pulselli <i>et al.</i> (2008); Liu <i>et al.</i> (2015);; Li <i>et al.</i> (2011); Pan <i>et al.</i> (2016); Rothrock, (2014)
$9,44 \times 10^{24}$	China	Fang <i>et al.</i> (2015); Shao <i>et al.</i> (2014); Shao <i>et al.</i> (2013);
	EUA	Yuan <i>et al.</i> (2011); Baoshan <i>et al.</i> (2011); Srinivasan <i>et al.</i> (2011); Morrison <i>et al.</i> (2016); Meng <i>et al.</i> (2014)
12×10^{24}	China	Yi & Braham (2015) ;Chen <i>et al.</i> (2016)
Linhas de Bases não Identificadas	China	Luo <i>et al.</i> (2015); Pang <i>et al.</i> (2015); Gao <i>et al.</i> (2012);
	Itália	Chen <i>et al.</i> (2011); Siracusa & La Rosa (2006)

Fonte: A Autora (2017)

Como apresentado anteriormente neste estudo, a linha de base encontrada na maior parte dos trabalhos é de $15,83 \times 10^{24}$, isso pode ser justificado pelo fato que em 2000 surgiu o manual de energia, o qual se tem o modelo da linha de base por meio de equação que se calcula a energia solar, geotérmica e da maré. Vale lembrar que existem várias propostas de linha de base que se deve utilizar, podendo variar de região para região de acordo com os objetivos dos autores.

5.6 Vantagens e Limitações

Com a coleta dos artigos selecionados, esta pesquisa conseguiu identificar algumas vantagens e limitações sobre a metodologia EmA. De acordo com Yi & Braham (2015), EmA é um método de avaliação global, o qual se adequa na indústria da construção civil, além disso, os autores afirmam que o mesmo possui potencial para ser uma ferramenta de tomada de decisão para elaborar novas edificações sustentáveis. Por outro lado, há ausência de um procedimento de atividades para realizar o EmA, por causa da limitação da acessibilidade aos dados. Para Yi et al. (2015) este método está em vantagem quando comparado a outros convencionais encontrados na literatura, pois realiza comparações de energias diferentes e disponíveis para assim analisar quantitativamente a energia de cada produto. Porém, os autores reforçam a ausência de um procedimento para realizar o método e as informações para os dados não é de fácil coleta.

Para Morrison et. al (2016) a vantagem desse método é a escala de sua aplicação, tanto em tempo quanto em quantidade de materiais que estão disponíveis, fazendo com que energia seja calculada, realizando comparações entre processos. De acordo com Hau & Bakshi, (2004), EmA é um método que se tem dificuldades em encontrar com facilidade os valores das transformidades dos itens que serão analisados e os valores da linha de base global de energia como também, não existe um procedimento padrão para a síntese de energia dos recursos. Esses autores também afirmam que é difícil realizar o cálculo de energia, devido principalmente a dificuldade da coleta de dados que são demorados e realizar suas devidas interpretações. Zhang (2014) afirmam que um dos principais pontos fortes da EmA é a capacidade de analisar a evolução dos recursos e serviços ecológicos nos sistemas econômicos em uma base energética, para internalizar os custos externos. Segundo Yu et al., (2016), EmA é uma ferramenta desafiadora, pois é possível quantificar as interações complexas entre os sistemas econômicos, naturais e sociais, minimizando os custos e impactos ambientais.

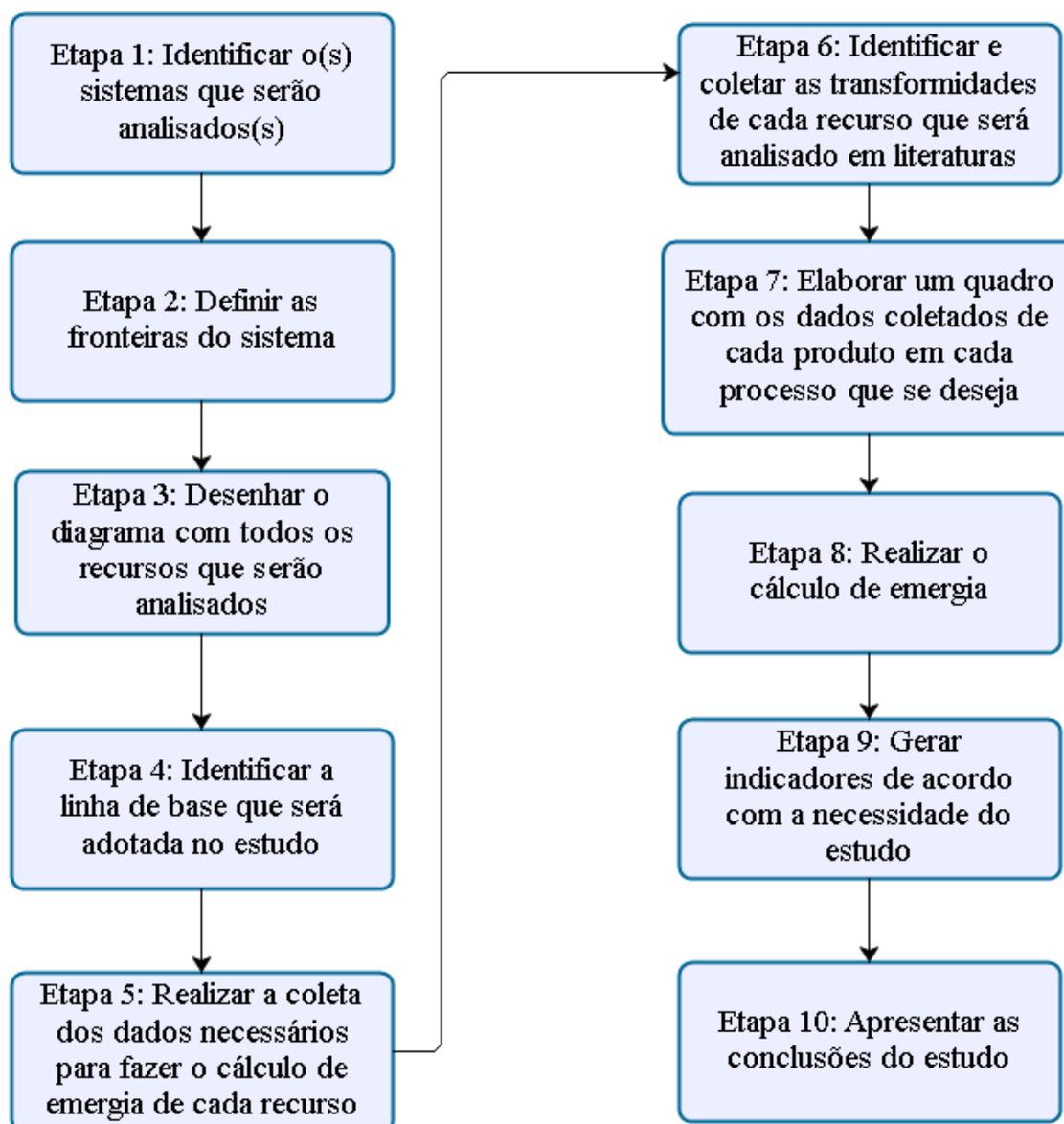
Vale ressaltar que devido a essas características encontradas nesses trabalhos, a avaliação de energia exige um cálculo algébrico complexo, pois inclui por exemplo propriedades dos materiais utilizados, o tempo gasto na identificação dos valores de energia específica dos itens que serão estudados, associando com a energia da biosfera, para assim executar um modelo e fazer sua aplicação (Yi et al., 2015).

De acordo com a literatura, as limitações sobre esse método está associada aos dados disponíveis dos elementos e o tempo que é gasto coletando as informações necessárias para

rodar um sistema. É importante destacar que autores como Srinivasan et al. (2015) desenvolveram uma base de dados para elementos da indústria da construção, onde mais de 60 componentes foram identificados e avaliados em relação as suas propriedades, volume, transformidades, com finalidade de facilitar a análise para pesquisadores (Yi et al., 2015).

Diante desta pesquisa, foi possível identificar a ausência de um fluxo padrão com os principais procedimentos para realização de uma aplicação utilizando o método EmA e por meio da evolução dos trabalhos publicados na indústria da construção (Siracusa & La Rosa, 2006; Li et al., 2011; Srinivasan et al., 2011; Pan et al., 2016 ; Zhang et al., 2017), contexto de agricultura e pecuária (Zhang & Long, 2010; Wang et al., 2014; Sha et al., 2015) e para o contexto de turismo (Lei et al., 2011), foi possível identificar as etapas clássicas e elaborar um passo a passo básico das atividades que serão necessárias para aplicação do EmA em diversos contextos (figura 5).

Figura 5- Fluxo Padrão de Aplicação para a metodologia EmA



Fonte: A Autora (2017)

Com base na figura 5 é importante destacar que na etapa 2 é necessário saber onde o processo se iniciará, quais etapas irão ser analisadas até atingir o fim desejado da atividade. Na etapa 5 foram fornecidos alguns dados possíveis para realizar o cálculo de energia, conforme os artigos encontrados na literatura que utilizaram equações matemáticas. Vale ressaltar que em estudos pesquisados, foi possível identificar uma predominância no uso das informações como quantidade, volume, densidade, valor monetário para cada item que será analisado. Para a etapa 4, é importante destacar que todos os valores das transformidades devem ser ajustados para a linha de base adotada.

Na etapa 7, de acordo com a disponibilidade das informações do processo, será

possível elaborar um quadro com os recursos que se deseja estudar. Logo, será possível realizar o cálculo básico de energia, pois se terá informações suficientes.

5.7 Modelos analíticos encontrados na Literatura

Diante dos artigos coletados para realizar este estudo, foi possível identificar que alguns trabalhos utilizaram equações matemáticas para a aplicação do EmA no contexto da indústria da construção.

Por meio da leitura e conteúdo abordado em cada trabalho que considerou as três fases principais de uma obra (construção, uso e ocupação e manutenção), foi elaborado uma tabela, a qual classifica as equações matemáticas em clássicas e equações que incorporaram determinados fatores no EmA (tabela 5). Vale ressaltar que cada autor considera entradas e saídas diferentes, porém todos os trabalhos partem do princípio fundamental para realizar o cálculo de energia em cada item do processo que será analisado (Tabela 4).

Tabela 3- Equações utilizadas como princípio fundamental do Cálculo EmA

$B_K = \sum_i T_r \times E_i$	Equação 1
$E_m = E_i \times T_{ri}$	Equação 2
$U = \sum_i UEV_i \times E_i$	Equação 3

Fonte: A Autora (2017)

Onde E_m ou B_K ou U (equação 1, 2 e 3) é a energia total de um processo, T_ri é a transformidade do n-ésimo (i) componente (equação 1 e 2) e UEV representa a energia específica de um elemento que se deseja avaliar, ou seja, transformidade.

As equações de 1 a 3 podem ser encontradas nos estudos publicados por Buranakarn (1998), Pulselli et al. (2006), Li et al. (2011), Akhtar et al. (2015), Yi et al. (2015), Yi et al. (2017), validando que o procedimento básico é identificação e coleta das informações como massa, volume, densidade, energia de cada item analisado, posteriormente coloca-se todos os insumos em uma unidade comum, para assim multiplicar pela transformidade específica encontrada em trabalhos anteriores, ou seja, cada item precisa da sua transformidade para assim, calcular a energia.

Tabela 4- Classificação dos Modelos Analíticos encontrados na literatura

Classificação das Equações Encontradas na Literatura	Referências	Justificativa da Classificação
Modelos Analíticos Clássicos	Buranakarn (1998) Pulselli et al. (2006) Pulselli et al. (2007) Li et al. (2011) Yi et al. (2015)	Nesses estudos, foi utilizado o princípio fundamental para o cálculo de energia, ou seja, coletou-se dados como volume, densidade, massa e energia de cada item que deseja analisar, em seguida é necessário colocar em uma mesma unidade, para assim multiplicar pela transformidade específica de cada item, que estão em literaturas anteriores, e finalmente calcular a energia.
Modelos Analíticos que incorporaram determinados fatores no EmA	Siracusa & La Rosa (2006) Arias & Brown (2009) Srinivasan et al. (2012) Akthar et al. (2014) Yi & Braham (2015) Liu et al. (2015) Luo et al. (2015) Yi et al. (2015) Andric et al. (2017)	Esses estudos construíram novas equações matemáticas por meio do princípio fundamental do cálculo de energia. Algumas equações acrescentaram parâmetros como anos de vida do material, consumo anual de energia em diferentes temperaturas, quantidade de energia eólica para diferentes região, métodos, simulações e softwares utilizados para incrementar o modelo (como <i>fuzzy</i> , Anova, Monte Carlo, Reed, que calcula a área da superfície da água em uma estação de tratamento, SimaPro, entre outros), justificando assim a complexidade exigida.

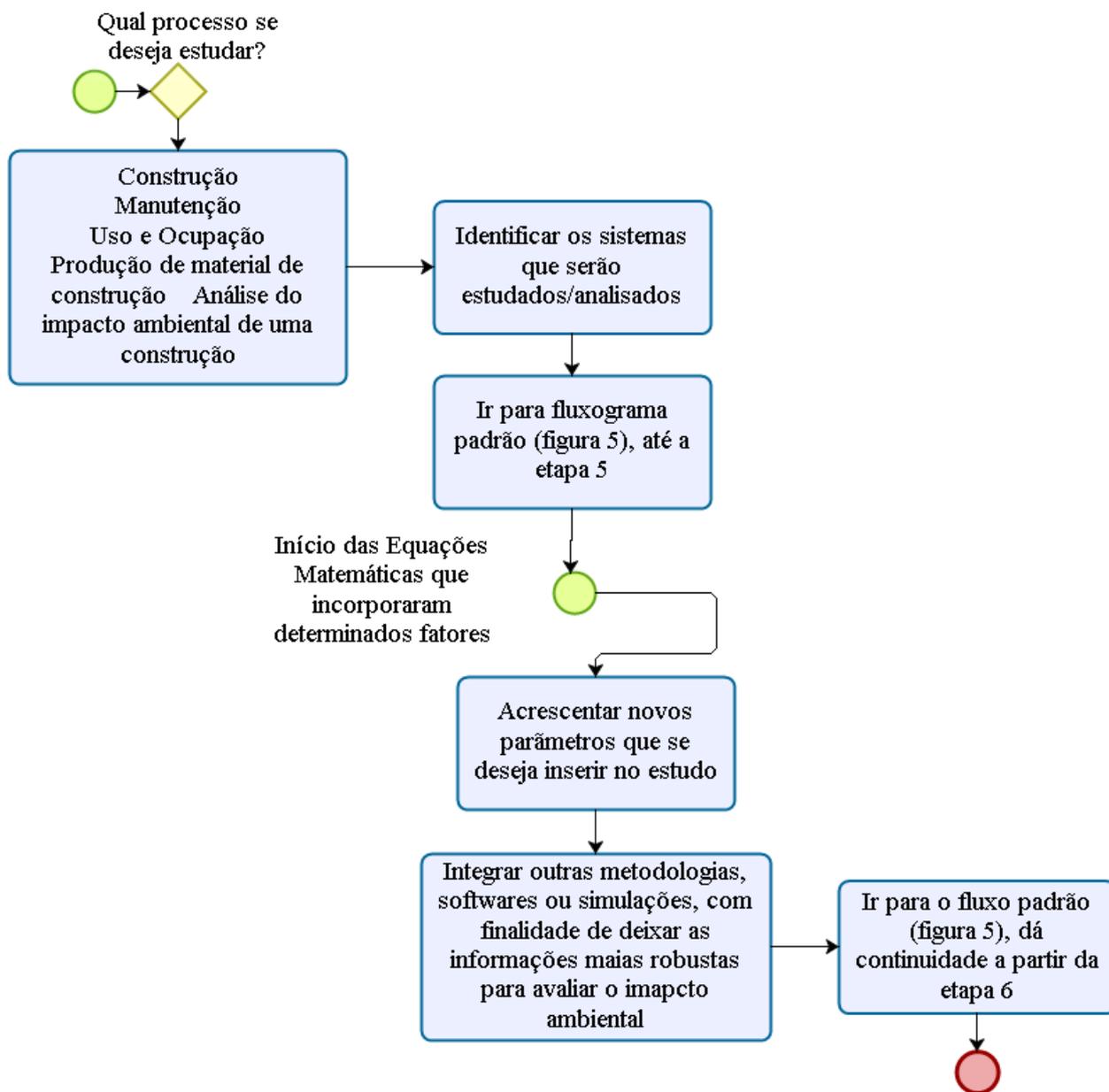
Fonte: A Autora (2017)

5.8 Proposta de Fluxograma para o EmA no Contexto da Indústria da Construção Civil em que seu modelo analítico incorpora determinados fatores no EmA

De acordo com os artigos coletados nesta pesquisa, foi identificada a ausência de procedimentos para realizar uma aplicação na indústria da construção civil nas etapas de uma construção (fabricação, uso e ocupação e manutenção), além da produção de material e análise do impacto ambiental causado por alguma infraestrutura. Por isso, foram selecionados e analisados todos os trabalhos coletados nesta pesquisa, os quais desenvolveram uma abordagem da metodologia EmA no contexto da indústria da construção.

Por meio de análises das equações contidas nos artigos de Siracusa & La Rosa (2006), Pulselli et al. (2007), Li et al. (2011), Srinivasan et al., (2012), Fang et al. (2015), Pan et al. (2016), e da tese desenvolvida por Buranakarn (1998), foi elaborado um fluxograma com o objetivo de facilitar visualmente as atividades que devem ser realizadas para aplicação do EmA (Figura 6).

Figura 6- Fluxograma com atividades para realizar Aplicação do EmA



Fonte: A Autora (2017)

Por meio dos trabalhos foi identificado que de acordo com a proposta de cada pesquisa, diversos parâmetros podem ser adicionados, como é o caso dos artigos que abordam modelos analíticos que incorporam determinados fatores no EmA (tabela 5).

Diante desta pesquisa, em três artigos estudados na literatura, foi possível identificar alguns softwares que auxiliam pesquisadores, como SimaPro 7.1 (Akhtar et al., 2015), TRACI (Morrison et al., 2016) e AMDTreat (Winfrey et al., 2015), que são ferramentas, as quais utilizam banco de dados e métodos baseadas em sustentabilidade, que auxiliam na tomada de decisão em organizações, visando o impacto positivo do processo no meio

ambiente.

Outro aspecto encontrado nos trabalhos que utilizaram equações matemáticas que incorporam determinados fatores no EmA foi a utilização de métodos, como Building Simulation Energy, Building Energy Analysis, Meta Model Development que podem ser integrados para otimizar o EmA (Yi et al., 2015). Em outros trabalhos foram encontradas a aplicação da simulação Monte Carlo, Lógica Fuzzy, Método de decisão Multicritério AHP, análise de incerteza, análise de sensibilidade, com objetivo de melhorar o desempenho dos resultados obtidos (Pulselli et al., 2008; Yi & Braham, 2015; Pang et al. 2015, Akhtar et al., 2015; Chen et al., 2016).

5.9 Modelos Analíticos considerados clássicos para calcular a energia no contexto da Construção Civil

De acordo com os artigos coletados nesta pesquisa, observou-se que existem equações que utilizam parâmetros de fácil e simples coleta para assim calcular a energia de cada produto/serviço que se deseja estudar.

Portanto, foi identificado ausência de procedimentos para calcular a energia dos seguintes itens:

Trabalhos dos colaboradores

Metabolismo do colaborador (125 kcal/h);

Joule por caloria (4186 J/cal)

Horas de trabalho

Quantidade de resíduos gerados

Estimar a área

Valor da transformidade da terra

Número de andares da obra

Quantidade de solo utilizado

Considerar a erosão do solo para cada 1 metro de profundidade

Considerar densidade do solo

Valor da transformidade do solo

Número de andares da obra

Quantidade de material utilizado

Transformidade de cada material que se deseja analisar

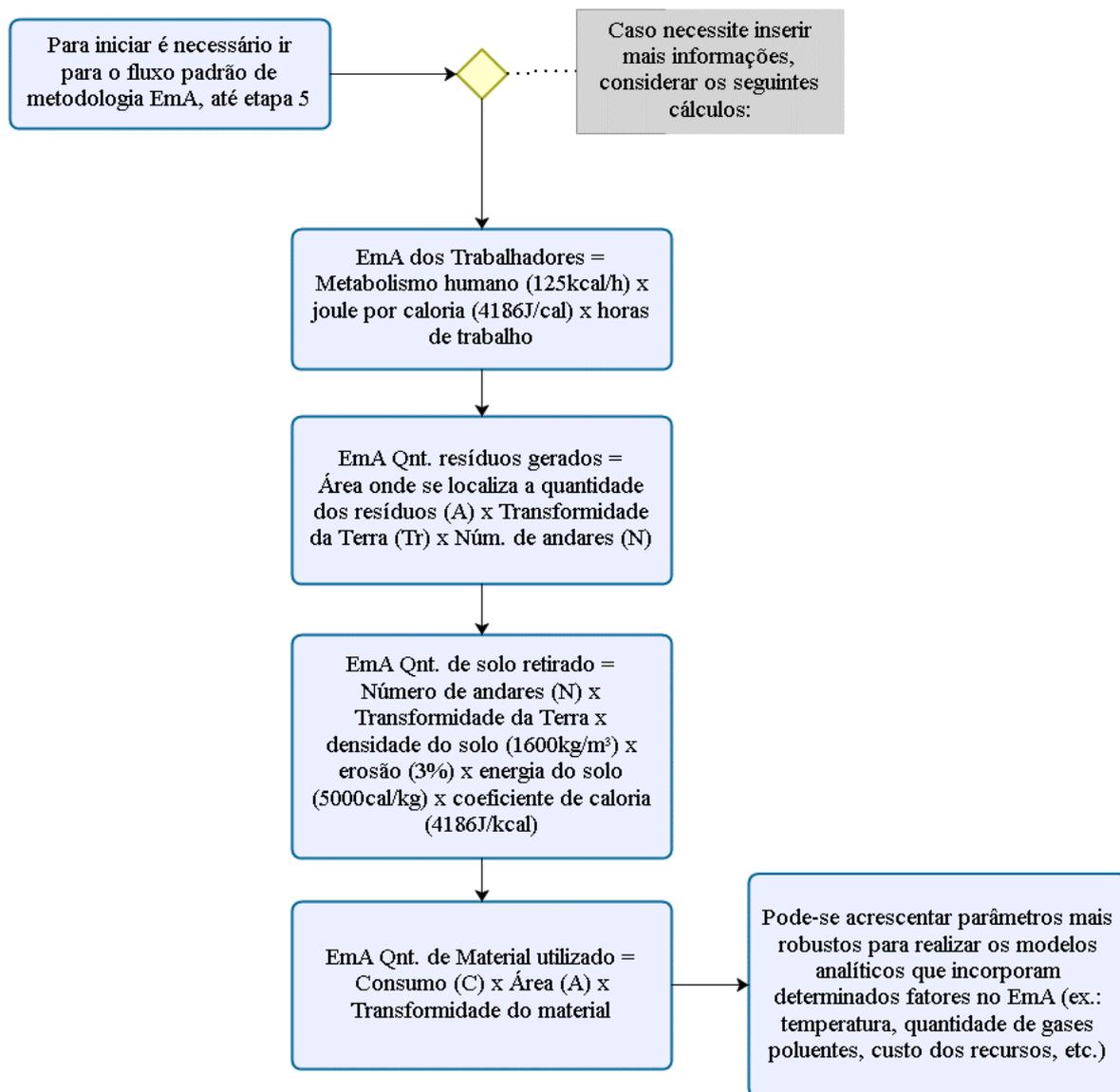
Quantidade de cada material

Consumo por área de cada material

Foi possível extrair essas informações nos estudos publicados em Siracusa & La Rosa (2006), Pulselli et al. (2007), Li et al. (2011), Srinivasan et al. (2012), Fang et al. (2015), Pan et al. (2016), Andrić et al. (2017), junto com a tese de Buranakarn (1998), validando a estrutura dos conceitos básicos para o cálculo de energia específica para esses parâmetros, os quais pesquisadores podem replicar sua aplicação em diversos contextos, como por exemplo, no contexto da agropecuária, turismo. É importante destacar que esses elementos e seus valores foram pré definidos em estudos passados.

A figura 7 tem como objetivo facilitar visualmente as atividades que devem ser realizadas para aplicação do EmA especificamente para os fatores já abordados anteriormente, os quais foram extraídos de trabalhos e que são considerados equações simples e aplicáveis neste estudo.

Figura 7- Atividades para EmA com equações clássicas



Fonte: A Autora (2017)

5.10 Exemplo Ilustrativo

Um estudo de caso é apresentado para exemplificar uma aplicação do EmA em um conjunto habitacional de casas populares. Segundo Napolini & Ruther,(2017), nos últimos anos, o governo brasileiro incentivou projetos em conjuntos habitacionais destinados exclusivamente a famílias de baixa renda. Além disso, diante da literatura, não foi encontrado nenhuma aplicação para obras com este tipo de característica.

Como descrição da obra deste estudo, o conjunto habitacional foi executado num Estado do Nordeste Brasileiro, sendo composto de 600 casas que seguem padrões especificados, com 48 m² de área construída. Por meio da literatura e com auxílio de um

coordenador da obra para fornecimento de informações, foi possível identificar e definir as principais etapas para execução de uma casa desta construção, juntamente com todos os processos, sistemas e recursos relevantes para cada fase, que foram definidos e categorizados por meio de artigos anteriormente analisados.

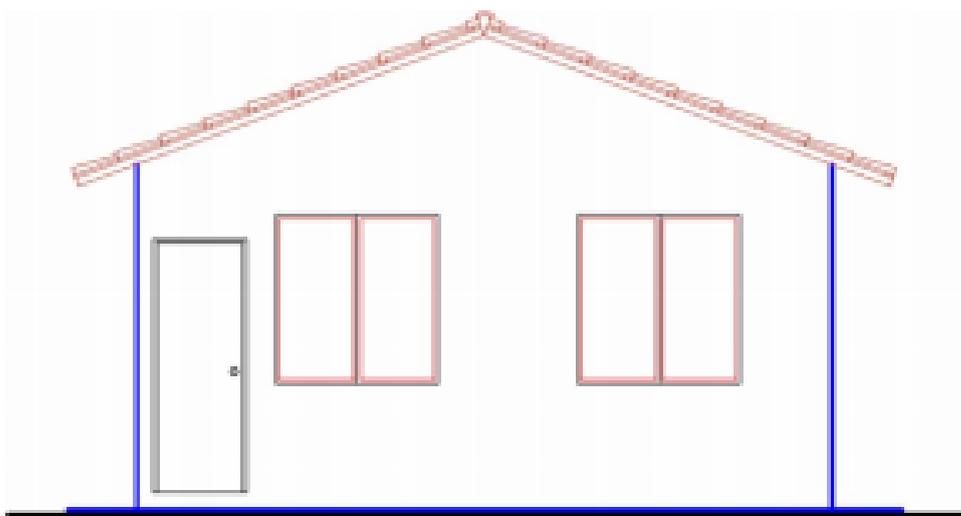
5.10.1 Definição das fases da Obra que serão consideradas para esta pesquisa

Por meio de artigos encontrados na literatura, foi possível identificar as fases e insumos que geralmente são considerados para uma construção convencional de obras residenciais (Yi et al., 2015). Por meio do acesso do projeto, foi identificado e sintetizados as fases para a construção desta obra específica:

- Fundação:
 - Compactação do terreno
 - Nivelamento do terreno
 - Colocação de lona plástica
 - Espalhar malhas
 - Distribuição de eletroduto rígido
 - Instalação hidráulica
 - Armação de radier
- Estrutura do envelope:
 - Paredes
 - Estrutura:
 - Armação das paredes
 - Forma Metálica
 - Concreto 20mpA
 - Contramarco de esquadrias
 - Contramarco de portas
 - Revestimento interno: gesso
 - Revestimento externo: Textura
 - Acabamento
 - Pintura
 - Térreo:
 - Nivelamento
 - Contra piso cimentado
 - Revestimento cerâmico
 - Rejunte
 - Cobertura:

- Madeira
- Telha
- Sistemas mecânicos e hidráulicos:
 - Passagens de instalações hidráulicas
 - Tubulação
 - Passagens de instalações elétricas
 - Eletrodutos
- Interior:
 - Janelas/Portas
 - Madeira
 - Pintura
 - Barrote
 - Acabamento do chão
 - Cerâmico
 - Banheiro
 - Louça
 - Iluminação

Figura 8- Casa padrão(conjunto habitacional) para famílias de baixa renda



Fonte: Vale et al. (2017)

Para realizar a análise de energia, esta pesquisa avaliou os principais insumos dos artigos anteriores, assim, foi possível verificar que o insumo renovável mais utilizado para obras residenciais convencionais é o de energia solar, ou seja, é considerado a transmissão de luz para o espaço interno (Meillaud et al., 2005; Pulselli et al., 2007; Aandric et al., 2017; Yi et al., 2017). Assim, para realizar a síntese de energia, este trabalho tomou como base a estudo de Yi et al. (2015) e Yi et al. (2017), pois o mesmo forneceu o maior número de informações semelhantes para esta construção residencial convencional, eliminando as etapas específicas para esta obra analisada. É importante destacar que a linha de base global utilizada foi de 12×10^{24} sej/ano, assim, impactando nos valores das transformidades dos recursos analisados. Então, a título ilustrativo essa pesquisa utilizou os seguintes insumos para a construção analisada para uma unidade habitacional:

Tabela 5- Cálculo de Emergia dos Recursos que serão analisados

Descrição	Dados	Qnt. (und)	Qnt. Para EmA (kg)	UEV (sej/und)	EmA (sej)	Dados Comerciais	Vida útil (Yi et al. 2017)	Intensidade EmA (sej/ano)	Ref.: UEV
Fundação	Aço	28,58 kg	28,58	$1,83 \times 10^{12}$	$5,23 \times 10^{13}$		78	$6,7 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
	Concreto	5 m ³	12500	$5,28 \times 10^{12}$	$6,6 \times 10^{16}$	Densidade: 2500kg/m ³	78	$8,54 \times 10^{14}$	Buranakarn (1998)
Soma			12528,6		$6,6 \times 10^{16}$			$8,56 \times 10^{14}$	
Estrutura do Envolvimento	Térreo								
	Rejunte	17 kg	17 kg	$2,94 \times 10^{12}$	5×10^{13}		67	$7,45 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
	Rev. Cerâmico	0,35 m ²	5,88 kg	$3,89 \times 10^{12}$	$2,3 \times 10^{13}$	Espessura: 10mm Densidade: 2,4g/cm ³	12	2×10^{12}	Buranakarn (1998)
	Paredes								
	Rev. Externo (concreto)	9,6m ³	24000 kg	$2,94 \times 10^{12}$	7×10^{16}		50	$1,4 \times 10^{15}$	Buranakarn (1998)
	Rev. Interno (gesso)	10 kg	10 kg	$1,27 \times 10^{12}$	$1,27 \times 10^{13}$		52	$2,44 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
	Portas Ext. e Int. (madeira)	4 pc	323 kg	$1,12 \times 10^{12}$	$2,6 \times 10^{14}$	Espessura: 4cm Densidade: 785kg/m ³	31	8×10^{12}	Odum (1996)

	Janelas (madeira)	4 pc	283 kg	$1,12 \times 10^{12}$	$3,2 \times 10^{14}$	Espessura: 4cm Densidade: 785kg/m ³	38	$8,4 \times 10^{12}$	Buranakarn (1998)
	Pintura (Ext. e int.)	45 kg	45 kg	$1,93 \times 10^{13}$	$8,7 \times 10^{14}$		11	$7,9 \times 10^{13}$	Buranakarn (1998)
Cobertura									
	Telha	1666 und	0,0205 kg	$3,42 \times 10^{12}$	7×10^{10}	Espessura: 8mm Densidade: 16kg/m ³	31	$2,2 \times 10^9$	Buranakarn (1998)
	Madeira	26 und	0,02kg	$1,12 \times 10^{12}$	$2,2 \times 10^{10}$	Espessura: 5mm Densidade: 1,53 g/cm ³	38	$5,8 \times 10^8$	Buranakarn (1998)
Soma			24563 kg	$2,4 \times 10^{13}$	$9,2 \times 10^{10}$			$1,5 \times 10^{15}$	
Sist. Mecânicos e Hidráulicos	Tubos de alimentação de água (parte externa e água fria)	13m	16kg	$8,75 \times 10^{12}$	$1,4 \times 10^{14}$	Peso Linear (25 mm): 1,23kg/m	47	3×10^{12}	Meillaud et al. (2005)
	Tubos instalações hidrosanitárias (esgoto)								
	40mm	3,59 m	0,86 kg	$7,46 \times 10^{13}$	$6,41 \times 10^{13}$		30	$4,3 \times 10^{12}$	Buranakarn

								(1998)
	50mm	4,77 m	1,86 kg	$7,46 \times 10^{13}$	$1,39 \times 10^{14}$	30	$5,8 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
	100mm	3,60 m	3,17 kg	$7,46 \times 10^{13}$	$2,36 \times 10^{14}$	30	$6,5 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
Soma			22 kg		$5,8 \times 10^{14}$		$1,24 \times 10^{13}$	
Interior								
	Pia (banheiro)	3,3 kg	3,3 kg	$3,89 \times 10^{13}$	$1,3 \times 10^{14}$	30	$4,3 \times 10^{12}$	Buranakarn (1998)
	Chuveiro	455 g	0,455 kg	$3,89 \times 10^{13}$	$1,75 \times 10^{13}$	30	$5,8 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
	Bacia sanitária	14 kg	14 kg	$1,39 \times 10^{12}$	$1,95 \times 10^{13}$	30	$6,5 \times 10^{11}$	Buranakarn (1998)
	Cozinha (pia)	3,2 kg	3,2 kg	$1,83 \times 10^{12}$	$5,6 \times 10^{12}$	35	7×10^{11}	Buranakarn (1998)
	Iluminação	5 und	12 R\$	$1,39 \times 10^{12}$	$1,67 \times 10^{13}$	24	7×10^{11}	Bastianoni et al. (2009)
Soma			33kg		$1,9 \times 10^{14}$		$6,4 \times 10^{12}$	
Recurso Renovável	Solar	$6,25 \times 10^{10}$ J/ano			1		$6,25 \times 10^{10}$	Odum (1996)

Fonte: A Autora (2017)

De acordo com a literatura, por meio da energia calculada para cada item analisado, é possível gerar indicadores que fazem parte do método EmA. Como essa aplicação tem como base o trabalho de Yi et al. (2017), foi possível identificar e classificar cada elemento analisado em cada fase específica, assim, foram calculados os seguintes indicadores:

$$\text{Rendimento de energia (EYR)} = Y/F$$

$$Y = R + M + F$$

Y: Produção de energia de acordo com a base energética adotada

R: recurso renovável

F: recursos adquiridos

M: materiais complementares

$$\text{Carga Ambiental (ELR)} = (M+F) / R$$

$$\text{Índice de Sustentabilidade de energia (ESI)} = \text{EYR} / \text{ELR}$$

Tabela 6- Cálculo de Insumos de EmA e índices ambientais (und: $\times 10^{15}$ sej/ano)

Etapa analisada	R	M	F	Y	Referências
Fundação			0,856		
Estrutura do			1,5		
Envoltório					
Sistemas Mecânicos e Hidráulicos			0,0124		
Interior			0,0064		
Recurso Renovável	0,000063			0,000063	Yi et al. (2017)
Total	0,000063		2,4	0,000063	
EYR				0,0000265	
ELR				38095,2	
ESI				0,0000000007	

Fonte: A Autora (2017)

Por meio da tabela apresentada anteriormente (tabela 6), foi possível apresentar e calcular o total de energia e a intensidade de energia para cada insumo analisado nesta pesquisa, vale ressaltar que determinados dados foram obtidos a partir de estudos anteriores para elaboração dos cálculos. Posteriormente, foi calculado três índices que a metodologia EmA é capaz de determinar, onde EYR foi de $2,65 \times 10^{20}$, que significa o equilíbrio do fluxo e energia do sistema estudado nesta pesquisa, o impacto ambiental foi de 38095,2 (ELR), que de acordo com Cao & Fang (2007) quando este indicador for maior que 10 têm-se uma alta carga ambiental e por fim, foi calculado também o ESI, que é a proporção entre EYR e ELR, este indicador reflete na capacidade de elaborar um produto/serviço com um

menor impacto ambiental e maior lucro possível, como o ESI foi de 7×10^{25} , significa que o processo do sistema analisado não é sustentável a longo prazo, pois seu resultado apresentou o índice inferior a 1 (CAO & FANG, 2007).

Esta aplicação ilustra a necessidade de melhoria no processo construtivo da edificação considerada. De acordo com vários trabalhos encontrados na literatura (Cui et al., 2011; Pang et al. 2015; Chen et al., 2016; Andric et al. 2017), uma ação de melhoria seria utilizar materiais e processos que causem menos impacto ao meio ambiente, para assim, ter práticas sustentáveis nesse sistema e assim, alterar os valores de energia do processo, apresentando indicadores mais sustentáveis.

5.11 Considerações Finais sobre o Capítulo

É importante destacar que após analisar os trabalhos encontrados na literatura, verificou-se contribuições e aspectos importantes encontrados na literatura publicada sobre o EmA na indústria da construção civil, como também ausência de um framework clássico que auxilie futuras aplicações da metodologia EmA em diversos contextos. Outra consideração deste capítulo foi o desenvolvimento de outro framework de acordo com literaturas passadas, para o contexto específico na construção civil nas três fases em uma obra, além disso, por meio das transformidades encontradas em artigos anteriores que possuem aplicação com obras de características residenciais, foi possível aplicar o EmA em uma casa com 48 m², verificando assim, os valores de energia para cada recurso analisado neste estudo. Além disso, foi possível calcular os principais índices que a metodologia EmA adota, com finalidade de finalizar a aplicação para esta pesquisa, onde foi verificado que o processo analisado tem uma alta carga ambiental, além disso, esse processo é considerado não sustentável a longo prazo.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Devido à escassez de recursos disponíveis no meio ambiente, muitas organizações estão preocupadas em reduzir o impacto ambiental em suas atividades, que integrando com a dimensão financeira e social em seus processos, ganham competitividade no mercado, assegurando sua sobrevivência e credibilidade.

Este trabalho evidenciou a indústria da construção civil, pois foi verificado na literatura que este setor em todas suas fases (construção, uso e ocupação, manutenção, demolição) consome e explora recursos naturais, sendo fonte de impactos negativos causados ao meio ambiente. Além disso, a indústria da construção civil tem representatividade e importância econômica e social. Portanto, é essencial realizar práticas sustentáveis neste setor. Diante dos trabalhos explorados, foi possível apresentar o EmA, método de avaliação ambiental que auxilia na tomada de decisão em uma organização.

De acordo com a pesquisa realizada, foi verificado a ausência de trabalhos que explorem o método de contabilidade ambiental, conhecido como *Emergy Analysis* visando a indústria da construção civil, visto que na literatura publicada em bases de dados como *Web of Science – Main Collection (Thomson Reuters Scientific)* e SCOPUS há uma limitação de trabalhos nesta área. Por meio de estudos de acordo com o escopo desta pesquisa, foi validado que o EmA é ideal para ser aplicado e abordado no setor de construção civil, visto que essa metodologia consegue inserir diversos parâmetros para a mensuração ambiental em um sistema, realizando o cálculo de emergia e verificando se determinado processo é sustentável.

Apesar do crescimento do número de publicações sobre EmA nos últimos anos, o trabalho enfrentou uma limitação no tamanho da amostra de artigos analisados, justificando a carência de estudos que aplicam e abordam EmA na construção civil. A importância de explorar este tema pôde ser evidenciada durante este estudo, pois uma das maneiras de investigar a busca da sustentabilidade na indústria da construção civil é por meio de indicadores, que esta metodologia desenvolve. Por meio da revisão sistemática da literatura, foi possível identificar a perspectiva na qual a comunidade científica vem desenvolvendo seus estudos, para assim conduzir novas pesquisas na área que são fundamentais para o desenvolvimento sustentável no contexto da construção civil. A revisão conseguiu alcançar o objetivo geral deste trabalho apresentando um mapeamento genérico para aplicação da metodologia EmA, além identificar as principais contribuições encontradas nos artigos

científicos analisados, fornecendo assim informações sobre o EmA no contexto da indústria da construção civil.

Em relação aos objetivos específicos, esta pesquisa identificou um baixo número de publicações entre o ano de 2006 até 2010, com apenas seis artigos publicados encontrados nas duas bases de dados analisadas. Entre 2011 até 2016 observou-se uma maior concentração de artigos publicados, onde o ano de 2015 foi considerado o mais produtivo para esta pesquisa, com 10 trabalhos publicados, representando 34% do total dos estudos encontrados. Com relação aos periódicos, esta pesquisa identificou que os trabalhos foram publicados em 20 revistas, das quais *Journal of Clean Production*, *Building and Environmental* e *Ecological Indicators* apresentam em conjunto 30% dos trabalhos analisados. Também foi possível identificar uma participação significativa de artigos publicados em periódicos que contemplam setores como gestão de resíduos, produção de material de construção, energia, políticas energéticas, tecnologia ambiental, representando 41% dos trabalhos, envolvendo a temática EmA e construção civil.

A pesquisa identificou artigos que utilizaram o EmA no contexto de construção civil, onde 54% dos trabalhos aplicaram o EmA no continente asiático, destacando a China como o país com mais publicações (15 estudos do total dos trabalhos), que apresentaram artigos sobre infraestrutura e edificações. Verificou-se que 25% dos trabalhos foram aplicados na América do Norte, onde EUA apresentou 7 estudos. As demais aplicações ocorreram na Europa (18%) e América do Sul (4%). Já no continente africano e na Oceania não foi encontrado nenhuma aplicação dessa metodologia na área de construção.

A pesquisa também pôde identificar as fases de construção de uma obra que abordaram o EmA, destacando a etapa de construção, representando 45% do total dos estudos, em seguida da etapa de conclusão (24%), etapas integradas (construção; uso e ocupação; manutenção), com 13% e apenas um trabalho abordou a fase de concepção da obra e EmA, representando 3% dos trabalhos.

Esta pesquisa também identificou os objetivos e propostas dos pesquisadores, que adotaram uma linha de base em seus estudos. Foi identificado que 52% do total de trabalhos utilizou a linha de base $15,83 \times 10^{24}$, verificando que este valor pode ser justificado pelo manual de energia, que surgiu em 2000 com finalidade de aproximar os valores de energia por meio de uma equação que integra a energia solar, geotérmica e da maré, para assim calcular a energia de cada item que se deseja avaliar. Outros estudos utilizaram o valor da linha de base de $9,44 \times 10^{24}$ (representando 27,5% dos trabalhos), 12×10^{24} (representando apenas 3,5%) e nos demais estudos não foi possível identificar a linha de base

utilizada.

Por meio dos artigos coletados, a pesquisa encontrou as principais vantagens e limitações da metodologia EmA na indústria da construção. Segundo Yi & Braham (2015), EmA é um método que avalia um sistema de forma global e se adequa na indústria da construção, além disso, é uma ferramenta de tomada de decisão para elaborar novas obras sustentáveis. Para Yi et al. (2015) possui vantagem quando comparados a outros métodos convencionais que quantificam a sustentabilidade em um sistema, porém há uma ausência de um procedimento de atividades para realizar o EmA devido a acessibilidade e limitação dos dados. Portanto, diante desta dificuldade, a pesquisa elaborou um fluxo padrão com as principais etapas para aplicação da metodologia EmA.

Além disso, por meio dos artigos coletados, esta pesquisa pôde classificar as equações matemáticas encontradas na literatura em equações matemáticas clássicas e equações matemáticas que incorporam determinados fatores no EmA. A partir destas informações, foi possível verificar que para realizar o cálculo de energia de um processo, parte do princípio fundamental em multiplicar os dados dos elementos que serão analisados por suas respectivas transformidades.

Outra contribuição deste trabalho foi a elaboração de um framework, o qual considerou as equações matemáticas clássicas de energia, fornecendo as principais etapas e valores a serem considerados, quando se desejar calcular a energia dos resíduos gerados, quantidade de material, solo, máquinas e combustíveis utilizados e também a energia dos trabalhadores, assim será possível auxiliar futuras pesquisas com foco no EmA aplicado na construção civil. Além disso, esta pesquisa realizou um estudo de caso para uma casa de um conjunto habitacional, com o objetivo de calcular e fornecer três índices que o EmA calcula, assim, foi verificado que a construção analisada possui o índice EYR de $0,0000265 \times 10^{15}$, ELR de 38095,2, que de acordo com Cao & Fang (2007) quando este indicador for maior que 10 têm-se uma alta carga ambiental e por fim, ESI foi de $0,0000000007 \times 10^{15}$, significa que o processo do sistema analisado não é sustentável a longo prazo, pois seu resultado apresentou o índice inferior a 1 (CAO & FANG, 2007).

Diante dos resultados, o exemplo de caráter ilustrativo apresentado neste estudo forneceu índices e informações importantes, dando indícios de que esse processo não é sustentável a longo prazo. Nesse sentido, observa-se a existência de alternativas para que o sistema reduza os impactos ambientais, como por exemplo, práticas verdes podem ser adotadas, utilizar insumos, recursos e processos que não sejam tão agressivos ao meio ambiente (Mateus et al. 2013; Geng et al. 2014; Yi et al. 2017) ter apoio de políticas públicas

que auxiliem o investimento de melhores condições de recursos para elaboração deste tipo de obra (Pulselli et al. 2007; Geng et al. 2014; Rothrock 2014), utilizar também energias renováveis em seu processo produtivo (Pulselli et al., 2008; Pulselli et al. 2009), entre outras práticas que as organizações junto com o governo devem adotar para se destacar no mercado e também reduzir os impactos ambientais. Por fim, vale destacar que o impacto é bastante significativo quando se trata de conjuntos habitacionais com dezenas ou centenas de casas.

Como recomendação para trabalhos futuros, seria ideal que as próximas pesquisas elaborassem um banco de dados específico para o contexto de construção civil, com as devidas transformidades, para assim se ter um padrão de valores que se deve trabalhar e calcular a energia dos processos desejados neste setor, pois esta pesquisa encontrou dificuldades em localizar valores e processos específicos nos artigos.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, S., REZA, B., HEWAGE, K., SHAHRIAR, A., ZARGAR, A., & SADIQ, R. Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7(1): 973–992. 2015.
- ALENCAR, M. H., PRIORI, L., & ALENCAR, L. H. Structuring objectives based on value-focused thinking methodology: Creating alternatives for sustainability in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, 156 (17):62-73. 2017
- ANDRIĆ, I., PINA, A., FERRÃO, P., LACARRIÈRE, B., & LE CORRE, O. The impact of renovation measures on building environmental performance: An emergy approach. *Journal of Cleaner Production*. 162, 776–790. 2017
- ARIAS, M. E., & BROWN, M. T. Feasibility of using constructed treatment wetlands for municipal wastewater treatment in the Bogot, Savannah. *Ecological Engineering*. Colombia. 35(7), 1070–1078. 2009.
- CUI, Baoshan; HU, Bo; ZHAI, Hongjuan. Employing three ratio indices for ecological effect assessment of Manwan Dam construction in the Lancang River, China. *River research and applications*, v. 27, n. 8, p. 1000-1022, 2011.
- BARAL, N. R., WITUSZYNSKI, D. M., MARTIN, J. F., & SHAH, A. Sustainability assessment of cellulosic biorefinery stillage utilization methods using emergy analysis. *Energy*, 109, China. 13–28. 2016
- BASTIANONI, S., FACCHINI, A., SUSANI, L., & TIEZZI, E. (2007). Emergy as a function of exergy. *Energy*, 32(7), 1158–1162. 2006
- BASTIANONI, S., & MARCHETTINI, N. (1996). Ethanol Production From Biomass : Analysis of Process Efficiency and Sustainability, *Energy* .11(5). 56-72. 1996.
- BROWN, M. T., & BURANAKARN, V. Emergy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options. *Resources, Conservation and Recycling*, 38(1), 1–22. 2003.
- BROWN, M. T., CAMPBELL, D. E., DE VILBISS, C., & ULGIATI, S. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. *Ecological Modelling*, 339, 92–95. 2016
- BROWN, M. T., RAUGEI, M., & ULGIATI, S. On boundaries and “investments” in Emergy Synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. *Ecological Indicators*, 15(1), 227–235. 2012.
- BROWN, M. T., & ULGIATI, S. (2002). Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of Cleaner Production*, 10(4), 321–334. 2002.
- BROWN, M. T., & ULGIATI, S. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum’s contributions to quantifying and understanding systems. *Ecological Modelling*, 178 (2), 201–213. 2004.

- BROWN, M. T., & ULGIATI, S. (2010). Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: A review and refinement of the emergy baseline. *Ecological Modelling*, 221(20), 2501–2508. 2010.
- BURANAKARN, V. Evaluation of recycling and reuse of building materials using the emergy analysis method. EUA. 1998. 281p. (Tese - Unisersity of Florida).
- CAMPBELL, D. E. A Revised Solar Transformity for Tidal Energy Received by the Earth and Dissipated Globally: Implications for Emergy Analysis. *Emergy Synthesis*. 81–99. 2000.
- CAMPBELL, D. E., BRANDT-WILLIAMS, S. L., & CAI, T. Current Technical Problems in Emergy Analysis. *Proceedings from the Third Biennial Emergy*. 2004.
- CAO, K., & FENG, X. Distribution of emergy indices and its application. *Energy and Fuels*, 21(3), 1717–1723. 2007.
- CARTER, C. R., & ROGERS, D. S. A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360–387. 2008.
- CHEN, G. Q., SHAO, L., CHEN, Z. M., LI, Z., ZHANG, B., CHEN, H., & WU, Z. Low-carbon assessment for ecological wastewater treatment by a constructed wetland in Beijing. *Ecological Engineering*, 37(4), 622–628. 2011.
- CHEN, W., LIU, W., GENG, Y., OHNISHI, S., SUN, L., HAN, W. ZHONG, S. Life cycle based emergy analysis on China's cement production. *Journal of Cleaner Production*. Japão 131, 272–279. 2016.
- CLEVELAND, C. J., KAUFMANN, R. K., & STERN, D. I. Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, 32, 301–317. 2000.
- DIAZ-CHAVEZ, R. A. Assessing biofuels: Aiming for sustainable development or complying with the market? *Energy Policy*, 39(10), 5763–5769. 2011.
- DUAN, H., EUGSTER, M., HISCHIER, R., STREICHER-PORTE, M., & LI, J. Life cycle assessment study of a Chinese desktop personal computer. *Science of the Total Environment*, 407(5), 1755–1764. 2009.
- FANG, D., CHEN, S., & CHEN, B. Emergy analysis for the upper Mekong river intercepted by the Manwan hydropower construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 899–909. 2015.
- GAO, L., CUI, S., YANG, D., TANG, L., VAUSE, J., XIAO, L., SHI, L. Sustainability and Chinese urban settlements: Extending the metabolism model of emergy evaluation. *Sustainability*. Suíça. 8(5), 1–17. 2016.
- GAO, R. Y., SHAO, L., LI, J. S., GUO, S., HAN, M. Y., MENG, J. LIN, C. (2012). Comparison of greenhouse gas emission accounting for a constructed wetland wastewater

treatment system. *Ecological Informatics*, 12, 85–92. 2012.

GENG, Y., ZHANG, P., ULGIATI, S., & SARKIS, J. Emergy analysis of an industrial park: The case of Dalian, China. *Science of the Total Environment*, China, 408(22), 5273–5283. 2010.

HAPIO, A., & VIITANIEMI, P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), 469–482. 2008.

HAU, J. L., & BAKSHI, B. R. Promise and problems of emergy analysis. *Ecological Modelling*, 178(1–2), 215–225. 2004.

HEBERLING, M. T.; HOPTON, M. E. San Luis Basin sustainability metrics project: a methodology for evaluating regional sustainability Special Collection. *J Environ Manage*, v. 111, p. 272-278, 2012.

KANG, D., & PARK, S. S. Emergy evaluation perspective of a multipurpose dam proposal in Korea. *Journal of Environmental Management*, 66(3), 293–306. 2002.

KITCHENHAM, B., & CHARTERS, S. (2007). Guidelines for performing Systematic Literature reviews in Software Engineering Version 2.3. Inglaterra 45(4ve), 1051. (Tese - Department of Computer Science - University of Durham).

LARCHER, D., & TARASCON, J.-M. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, França 7(1), 19–29. 2014.

LEI, K., LIU, L., HU, D., & LOU, I. Mass, energy, and emergy analysis of the metabolism of Macao. *Journal of Cleaner Production*, 114, 160–170. 2016.

LEI, K., ZHOU, S., HU, D., GUO, Z., & CAO, A. (2011). Emergy analysis for tourism systems: Principles and a case study for Macao. *Ecological Complexity*, 8(2), 192–200. Abril.

LI, D., ZHU, J., HUI, E. C. M., LEUNG, B. Y. P., & LI, Q. An emergy analysis-based methodology for eco-efficiency evaluation of building manufacturing. *Ecological Indicators*, China. 11(5), 1419–1425. 2011.

LI, Dezhi et al. An emergy analysis-based methodology for eco-efficiency evaluation of building manufacturing. *Ecological indicators*, v. 11, n. 5, p. 1419-1425, 2011.

LI, J., THARAKAN, P., MACDONALD, D., & LIANG, X. Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry. *Energy Policy*, 61, 1377–1387. 2013.

LIANG, H., REN, J., DONG, L., GAO, Z., ZHANG, N., & PAN, M. Is the hydrogen production from biomass technology really sustainable? Answer by life cycle emergy analysis. International. *Journal of Hydrogen Energy*, 41(25), 10507–10514. 2016.

LIEN, G., BRIAN HARDAKER, J., & FLATEN, O. Risk and economic sustainability of crop farming systems. *Agricultural Systems*, 94(2), 541–552. 2007.

LITTLE, J. C., HESTER, E. T., & CAREY, C. C. Assessing and Enhancing Environmental Sustainability: A Conceptual Review. *Environmental Science and Technology*, 50(13), 6830–

6845. 2016.

LIU, G., YANG, Z., CHEN, B., ZHANG, J., LIU, X., ZHANG, Y. ULGIATI, S. Scenarios for sewage sludge reduction and reuse in clinker production towards regional eco-industrial development: A comparative emergy-based assessment. *Journal of Cleaner Production*, 103, 371–383. 2015.

LIU, G., YANG, Z., CHEN, B., & ZHANG, L. Modelling a thermodynamic-based comparative framework for urban sustainability: Incorporating economic and ecological losses into emergy analysis. *Ecological Modelling*, 252(1), 280–287. 2013.

LOISEAU, E., JUNQUA, G., ROUX, P., & BELLON-MAUREL, V. Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods. *Journal of Environmental Management*, 112, 213–225. 2012.

LUO, Z., ZHAO, J., YAO, R., & SHU, Z. Emergy-based sustainability assessment of different energy options for green buildings. *Energy Conversion and Management*, 100, 97–102. 2015.

MALMQVIST, T., & GLAUMANN, M. Environmental efficiency in residential buildings - A simplified communication approach. *Building and Environment*, 44(5), 937–947. 2009.

MARTIN, J. F., DIEMONT, S. A. W., POWELL, E., STANTON, M., & LEVY-TACHER, S. Emergy evaluation of the performance and sustainability of three agricultural systems with different scales and management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 115(1–4), 128–140. 2006.

MATEUS, R., NEIVA, S., BRAGANÇA, L., MENDONÇA, P., & MACIEIRA, M. Sustainability assessment of an innovative lightweight building technology for partition walls e Comparison with conventional technologies. *Building and Environment*, 67, 147–159. 2013.

MEILLAUD, F.; GAY, J.-B.; BROWN, M. T. Evaluation of a building using the emergy method. *Solar Energy*, v. 79, n. 2, p. 204-212, 2005.

MENG, Jing et al. Embodied exergy-based assessment of energy and resource consumption of buildings. *Frontiers of Earth Science*, v. 8, n. 1, p. 150-162, 2014.

MILNE, Markus J.; GRAY, Rob. W (h) ither ecology? The triple bottom line, the global reporting initiative, and corporate sustainability reporting. *Journal of business ethics*, v. 118, n. 1, p. 13-29, 2013.

MORRISON, Marc; SRINIVASAN, Ravi S.; RIES, Robert. Complementary life cycle assessment of wastewater treatment plants: An integrated approach to comprehensive upstream and downstream impact assessments and its extension to building-level wastewater generation. *Sustainable Cities and Society*, v. 23, p. 37-49, 2016.

NAKAJIMA, Elisa Sayoko; ORTEGA, Enrique. Exploring the sustainable horticulture productions systems using the emergy assessment to restore the regional sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 531-538, 2015.

NASPOLINI, Helena F.; RÜTHER, Ricardo. Impacts of Domestic Solar Water Heating (DSWH) systems on the cost of a hot shower in low-income dwellings in Brazil. *Renewable*

Energy, v. 111, p. 124-130, 2017.

ODUM, Howard T. *Environmental accounting: energy and environmental decision making*. Wiley, 1996.

PALME, Ulrika et al. Sustainable development indicators for wastewater systems—researchers and indicator users in a co-operative case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 43, n. 3, p. 293-311, 2005.

PAN, Hengyu et al. Sustainability evaluation of a steel production system in China based on emergy. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 1498-1509, 2016.

PANG, Mingyue et al. Ecological impacts of small hydropower in China: Insights from an emergy analysis of a case plant. *Energy Policy*, v. 76, p. 112-122, 2015.

Paoli, C., Vassallo, P., & Fabiano, M. Solar power: An approach to transformity evaluation. *Ecological Engineering*, 34(3), 191–206. 2008

PAPAJOHAN, Dean; BRINKER, Chris; EL ASMAR, Mounir. MARS: Metaframework for assessing ratings of sustainability for buildings and infrastructure. *Journal of Management in Engineering*, v. 33, n. 1, p. 04016026, 2016.

PULSELLI, F. M.; PULSELLI, R. M.; SIMONCINI, E. Environmental accounting of buildings: outcomes from the emergy analysis. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 93, 2006.

PULSELLI, R. M. et al. Sustainability concern of housing: emergy storage and flow assessment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 99, 2006.

PULSELLI, Riccardo Maria; SIMONCINI, Eugenio; MARCHETTINI, Nadia. Energy and emergy based cost–benefit evaluation of building envelopes relative to geographical location and climate. *Building and Environment*, v. 44, n. 5, p. 920-928, 2009.

PULSELLI, R. M. et al. Emergy analysis of building manufacturing, maintenance and use: Em-building indices to evaluate housing sustainability. *Energy and buildings*, v. 39, n. 5, p. 620-628, 2007.

PULSELLI, R. M. et al. Specific emergy of cement and concrete: An energy-based appraisal of building materials and their transport. *Ecological indicators*, v. 8, n. 5, p. 647-656, 2008.

REZA, Bahareh et al. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants: A case study of Metro Vancouver Waste Management. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 81, p. 105-114, 2013.

ROODMAN, David Malin; LENSSEN, Nicholas K.; PETERSON, Jane A. *A building revolution: how ecology and health concerns are transforming construction*. Washington, DC: Worldwatch Institute, 1995.

ROTHROCK, Heather. Sustainable housing: Emergy evaluation of an off-grid residence. *Energy and Buildings*, v. 85, p. 287-292, 2014.

- RUGANI, Benedetto; BENETTO, Enrico. Improvements to emergy evaluations by using life cycle assessment. *Environmental science & technology*, v. 46, n. 9, p. 4701-4712, 2012.
- RUSSELL, Richard C. Constructed wetlands and mosquitoes: health hazards and management options—an Australian perspective. *Ecological Engineering*, v. 12, n. 1-2, p. 107-124, 1999.
- RYDBERG, Torbjörn; HADEN, Andrew C. Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 117, n. 2-3, p. 145-158, 2006.
- RYDBERG, Torbjörn; JANSÉN, Jan. Comparison of horse and tractor traction using emergy analysis. *Ecological Engineering*, v. 19, n. 1, p. 13-28, 2002.
- SAAD, Rosie et al. Assessment of land use impacts on soil ecological functions: development of spatially differentiated characterization factors within a Canadian context. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 16, n. 3, p. 198-211, 2011.
- SCIUBBA, Enrico; ULGIATI, Sergio. Emergy and exergy analyses: complementary methods or irreducible ideological options?. *Energy*, v. 30, n. 10, p. 1953-1988, 2005.
- SHA, Zhipeng et al. Evaluation of raising geese in cornfields based on emergy analysis: A case study in southeastern Tibet, China. *Ecological Engineering*, v. 84, p. 485-491, 2015.
- SHAO, Ling et al. Systems ecological accounting for wastewater treatment engineering: method, indicator and application. *Ecological indicators*, v. 47, p. 32-42, 2014.
- SHAO, Ling et al. Embodied energy assessment for ecological wastewater treatment by a constructed wetland. *Ecological modelling*, v. 252, p. 63-71, 2013.
- SIRACUSA, G.; LA ROSA, A. D. Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the emergy analysis. *Ecological modelling*, v. 197, n. 3-4, p. 490-497, 2006.
- SONG, Qingbin; WANG, Zhishi; LI, Jinhui. Sustainability evaluation of e-waste treatment based on emergy analysis and the LCA method: a case study of a trial project in Macau. *Ecological indicators*, v. 30, p. 138-147, 2013.
- SRINIVASAN, Ravi S.; CAMPBELL, Daniel E.; WANG, Wei. Renewable Substitutability Index: Maximizing Renewable Resource Use in Buildings. *Buildings*, v. 5, n. 2, p. 581-596, 2015.
- SRINIVASAN, R. S., BRAHAM, W. W., CAMPBELL, D. E., & CURCIJA, C. D. Re(De)fining Net Zero Energy: Renewable Emergy Balance in environmental building design. *Building and Environment*, 47(1), 300–315. 2012.
- SRINIVASAN, Ravi S. et al. Building envelope optimization using emergy analysis. In: *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building*

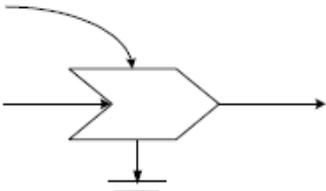
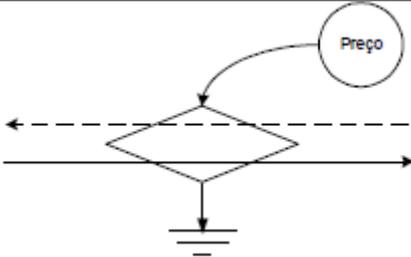
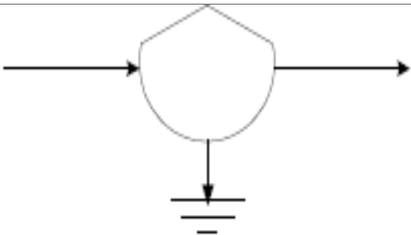
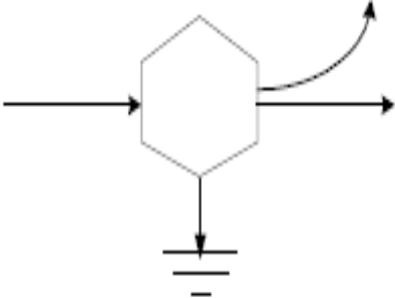
- Performance Simulation Association, Sydney. 2011. p. 14e16.
- ULGIATI, S., & BROWN, M. T. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 108(1–3), 23–36. 1998.
- ULGIATI, S., & BROWN, M. T. Emergy and ecosystem complexity, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 14, 310–321 2009.
- ULGIATI, S., ODUM, H. T., & BASTIANONI, S. Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy. *Ecological Modelling*, 73(3–4), 215–268. 1994.
- VALE, A. M., FELIX, D. G., FORTES, M. Z., BORBA, B. S. M. C., DIAS, B. H., & SANTELLI, B. S. Analysis of the economic viability of a photovoltaic generation project applied to the Brazilian housing program “Minha Casa Minha Vida.” *Energy Policy*, 108, 292–298. 2017.
- WANG, W., JIANG, D., CHEN, D., CHEN, Z., ZHOU, W., & ZHU, B. A Material Flow Analysis (MFA)-based potential analysis of eco-efficiency indicators of China’s cement and cement-based materials industry. *Journal of Cleaner Production*, 112, 787–796. Julho. 2016.
- WANG, X., CHEN, Y., SUI, P., GAO, W., QIN, F., ZHANG, J., & WU, X. Emergy analysis of grain production systems on large-scale farms in the North China Plain based on LCA. *Agricultural Systems*, 128, 66–78. 2014.
- WANG, X., DADOUMA, A., CHEN, Y., SUI, P., GAO, W., & JIA, L. Sustainability evaluation of the large-scale pig farming system in North China: An emergy analysis based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 102, 144–164. Abril. 2015.
- WINFREY, B. K., NAIRN, R. W., TILLEY, D. R., & STROSNIDER, W. H. J. Emergy and Carbon Footprint Analysis of the Construction of Passive and Active Treatment Systems for Net Alkaline Mine Drainage. *Mine Water and the Environment*, 34(1), 31–41. 2015.
- WU, X., WU, F., TONG, X., & JIANG, B. Emergy-based sustainability assessment of an integrated production system of cattle, biogas, and greenhouse vegetables: Insight into the comprehensive utilization of wastes on a large-scale farm in Northwest China. *Ecological Engineering*, 61(12), 335–344. 2013.
- YANG, H., CHEN, L., YAN, Z., & WANG, H. Emergy analysis of cassava-based fuel ethanol in China. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 581–589. 2010.
- YI, H., & BRAHAM, W. W. Uncertainty characterization of building emergy analysis (BEmA). *Building and Environment*, 92, 538–558. 2015.
- YI, H., SRINIVASAN, R. S., & BRAHAM, W. W. An integrated energy-emergy approach to building form optimization: Use of EnergyPlus, emergy analysis and Taguchi-regression method. *Building and Environment*, 84, 89–104. 2015.
- YI, H., SRINIVASAN, R. S., BRAHAM, W. W., & TILLEY, D. R. An ecological understanding of net zero energy building: Evaluation of sustainability based on emergy theory. *Journal of Cleaner Production*, 143, 654–671. 2017.

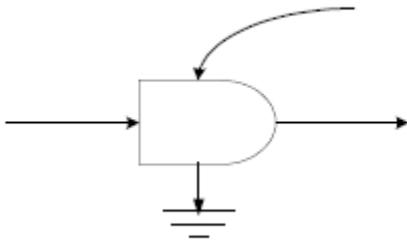
- YU, X., GENG, Y., DONG, H., ULGIATI, S., LIU, Z., LIU, Z. SUN, L. Sustainability assessment of one industrial region: A combined method of emergy analysis and IPAT (Human Impact Population Affluence Technology). *Energy*, 107, 818–830. 2016.
- YUAN, F., SHEN, L. YIN, & LI, Q. MING. Emergy analysis of the recycling options for construction and demolition waste. *Waste Management*, 31(12), 2503–2511. 2011.
- ZHANG, G., & LONG, W. A key review on emergy analysis and assessment of biomass resources for a sustainable future, *Energy Policy*, 38, 2948–2955. 2010.
- ZHANG, L.-X., PANG, M.-Y., & WANG, C.-B. Emergy analysis of a small hydropower plant in southwestern China. *Ecological Indicators*, 38, 81–88. 2014.
- ZHANG, L. X., YANG, Z. F., & CHEN, G. Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy*, 35(7), 3843–3855. 2007.
- ZHANG, X., SHEN, J., WANG, Y., QI, Y., LIAO, W., SHUI, W. YU, X. An environmental sustainability assessment of China's cement industry based on emergy. *Ecological Indicators*, 72, 452–458. 2017.

APÊNDICE A – SÍMBOLOS DO FLUXO DE ENERGIA PÊNDICE

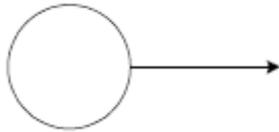
De acordo com a literatura, para elaborar um diagrama, é necessário identificar os processos e desenhar por meio de símbolos da linguagem de energia dos sistemas ecológicos para representar graficamente os componentes do sistema, fontes de energia e fluxos. A seguir, será apresentado os símbolos da linguagem de fluxos de energia utilizados nos diagramas sistêmicos.

Tabela 7- Símbolos da linguagem de fluxos

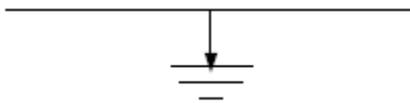
	<p>Fluxo de Energia: caminho cujo fluxo é proporcional à quantidade no estoque ou na fonte.</p>
	<p>Interação: Processo de transformação de energia potencial que exige a participação de várias formas de energia.</p>
	<p>Transação: Uma unidade que indica a venda de bens ou serviços (linha contínua) em troca de um pagamento em dinheiro (linha tracejada). O preço é mostrado na figura como fonte de energia externa.</p>
	<p>Depósito: Reserva de energia dentro do sistema, um lugar onde a energia fica armazenada. São exemplos: biomassa florestal, solo, matéria orgânica, água subterrânea, nutrientes, dentre outros.</p>
	<p>Consumidor: Unidade que transforma a qualidade da energia, armazena e retro alimenta energia à etapa anterior para melhorar o fluxo de energia que recebe.</p>



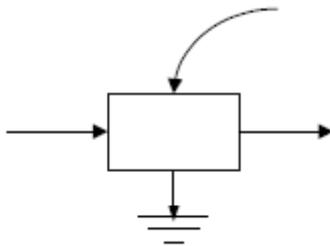
Produtor: Unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade em energia de qualidade superior.



Fonte: energia que acompanha cada recurso usado pelo ecossistema, como sol, vento, marés, ondas, chuva, dentre outros.



Sumidouro de energia: Degradação da energia, a qual deixa o sistema como energia de baixa intensidade, não podendo ser aproveitada (2ª Lei da Termodinâmica).



Caixa: Símbolo de uso múltiplo que pode ser usado para representar uma unidade de consumo e produção dentro de um sistema maior, representando assim, um subsistema.

Fonte: A Autora

Nota: Adaptação de Odum (1996)