



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

# **METABOLISMO URBANO E SUSTENTABILIDADE NAS CIDADES**

Luíza Costa Caldas

Projeto de Graduação apresentado ao  
Curso de Engenharia Ambiental da Escola  
Politécnica, Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do título de Engenheira.

Orientadora:

Angela Maria Gabriella Rossi, D. Sc.

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2017

# METABOLISMO URBANO E SUSTENTABILIDADE NAS CIDADES

Luíza Costa Caldas

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO  
DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA  
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA  
OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Examinado por:

---

Prof.a Angela Maria Gabriella Rossi, D. Sc.

---

Prof. Camilo Michalka Junior D. Sc.

---

Prof.a Gisele Silva Barbosa D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Fevereiro de 2017

Caldas, Luíza Costa

Metabolismo urbano e sustentabilidade nas cidades/

Luíza Costa Caldas – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola  
Politécnica, 2017.

X, N p.:il.; 29,7 cm

Orientadora: Angela Maria Gabriella Rossi

Projeto de Graduação – UFRJ/POLI/Curso de  
Engenharia Ambiental, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 53 - 56 .

1. Metabolismo Urbano; 2. Ecologia Industrial; 3.  
Biomimética; 4. Simbiose Urbana; 5. Ecologia Urbana;  
6. Projeto Urbano Sustentável.

I. Rossi, Angela Maria Gabriella.; II. Universidade  
Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de  
Engenharia Ambiental; III. Metabolismo urbano e  
sustentabilidade nas cidades.

## **Agradecimentos**

Agradeço a todos que fizeram parte desta jornada de aprendizagem, professores e funcionários da UFRJ, família e amigos.

Em especial, agradeço à professora Gabriella, que demonstrou compreensão e grande interesse no tema do projeto.

Agradeço à minha mãe Heloisa por todo o amor e dedicação total. Ao meu pai Fernando por todo o amor, carinho e inspiração. Agradeço à Bel, ao Roberto, às minhas tias Kátia, Thereza, Bia, Denise e Fátima por estarem sempre presentes. À minha avó Alzira e a todos os tios e primos. Celebro esta família linda em que sempre pude encontrar toda a força e apoio necessários.

Agradeço aos educadores e à turma do Gaia 2016, que fizeram toda diferença e sentido no encerramento deste ciclo da minha vida.

Às minhas amigas Belle, Erika, Patricia, Ana, Isabela, Vanessa, Bruna, Fabiana, Patricia, Érika, Mariana, Camila, Anna, Natalia e Juliana por tornarem mais leve e divertida esta caminhada.

À amizade, que se faz absurdamente concreta com Babi, Marina, Piera e Marina. Também com Cássia e Rúbia, que me acompanham na vida carioca.

A este planeta, por toda a sua abundância.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Metabolismo urbano e sustentabilidade nas cidades

Luíza Costa Caldas

Fevereiro/2017

Orientadora: Angela Maria Gabriella Rossi

Curso: Engenharia Ambiental

A maioria das cidades contemporâneas funciona como reatores lineares, com o consumo de bens e materiais de outro lugar, usados em edificações, infraestrutura para água, energia, comunicação ou transporte e resíduos que são amplamente descartados com reciclagem e reuso muito limitados. A partir de analogias com os processos metabólicos de um organismo, os modelos de metabolismo urbano quantificam as entradas, saídas e estoques de energia, água, nutrientes e materiais e oferecem aos projetistas informações essenciais sobre o impacto de suas decisões.

A percepção que separa o homem da natureza afeta o modo como são conduzidas e organizadas as atividades humanas. Utilizando a natureza como fonte de inspiração, preocupando-se em não esgotá-la e valorizando a diversidade podem ser criadas soluções holísticas que resultem em sistemas urbanos que funcionem na mesma lógica do equilíbrio de contas dos ecossistemas naturais.

Este trabalho busca discutir o conceito de metabolismo urbano, apresentando estudos e metodologias, assim como sua importância e principais desafios.

*Palavras-chave: Metabolismo urbano; Ecologia industrial; Biomimética; Simbiose urbana, Ecologia Urbana, Projeto Urbano Sustentável.*

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

Urban Metabolism and sustainability in the cities

Luíza Costa Caldas

February/ 2017

Advisor: Angela Maria Gabriella Rossi

Course: Environmental Engineering

Most of the contemporary cities works as linear reactors, consuming products and materials from other places, turning into buildings, water, energy, communication and transport infrastructure and wastes that are broadly discarded with limited recycling and reuse. Using the metaphor of the metabolism of an organism, the urban metabolism models quantify inputs, outputs and stock of energy, water, nutrients and materials and offer information about the impacts of our decisions.

The perception that human and nature are disconnected affects the way we conduce and organize our activities. Using nature as a source of inspiration, taking care not to exhaust it and valuing the diversity we can come up with holistic solutions that result in urban systems that work using the same logics of the balance of natural ecosystems.

This paper aims to discuss the concept of urban, introducing related concepts, studies and methodologies, as well as highlighting its importance and main challenges.

*Keywords: Urban Metabolism; Industrial Ecology, Biomimicry; Urban symbiosis; Uban Ecology; Sustainable Urban Project.*

## Sumário

1. Introdução .....	4
1.1 Apresentação do tema .....	4
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Justificativa.....	4
1.4 Metodologia .....	5
1.5 Estrutura do Trabalho.....	5
2. Cidades Sustentáveis: Abordagens que reapproximam Ambiente Construído e Ambiente Natural.....	6
2.1 Cidades e Natureza .....	6
2.2 Biomimética .....	10
2.3 Ecologia Urbana .....	12
2.4 Ecologia Industrial .....	13
2.5 Simbiose Urbana .....	15
2.5 Metabolismo Urbano.....	15
2.6 Síntese .....	16
3. Metabolismo Urbano como ferramenta para a sustentabilidade.....	17
3.1 Métodos e Ferramentas .....	21
3.1.1 Quadros econômicos de entrada-saída.....	21
3.1.2 Análise de Fluxo de Materiais .....	21
3.1.3 Avaliação do Ciclo de vida .....	24
3.1.4 Índice de Sustentabilidade pela Emergia.....	24
3.1.5 Estruturas do Metabolismo .....	25
3.1.6 Abordagem Multicamadas .....	29
3.1.7 Metodologia BRIDGE .....	30
3.2 Exemplos de Aplicações.....	31
3.2.1 Projeto para Portlands, Toronto .....	31
3.2.2 Hammarby Sjöstad .....	32
3.2.3 PERSU 2020.....	33
3.2.4 Diagnóstico Preliminar de Resíduos da Cidade do Rio de Janeiro.....	35
3.3 Relevância do Estudo.....	36
3.4 Desafios.....	38
4. Construindo um metabolismo urbano sustentável .....	41
4.1 O pensamento sistêmico na construção das cidades .....	41
4.1 Princípios do Metabolismo Urbano Sustentável.....	42
4.2 Atenção aos fluxos.....	44
4.3 Passos para a introdução dos princípios de metabolismo na construção das cidades.....	46

5. Considerações finais .....	51
5.1 Conclusões .....	51
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	52
Referências Bibliográficas.....	53



## Lista de Figuras

Figura 1 - (a) Sistema Urbano contido na biorregião (b) Evolução do sistema urbano com a criação de um núcleo . Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013. ....	8
Figura 2- Biorregiões e fluxos em uma economia global Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013. ....	9
Figura 3 - Estrutura do Metabolismo Urbano. Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013. ....	26
Figura 4 - Estrutura DPSIR para metabolismo urbano . Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013 ....	27
Figura 5 - Indicadores e saídas da modelagem. Fonte: Mostafavi <i>et al.</i> (2013).....	29
Figura 6 - Fluxograma da Metodologia BRIDGE. Fonte: traduzido de Chrysoulakis <i>et al.</i> , 2013.....	31
Figura 7 - Representação de um metabolismo sustentável para Portlands em Toronto (Kennedy <i>et al.</i> , 2010).....	32
Figura 8 - Modelo de Fluxo e estoque em Hammarby Sjöstad. Fonte: Traduzido de Iveroth, 2014. ....	33

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Quadro sinóptico de conceitos.....	17
Tabela 2 - Estudos sobre metabolismo urbano. Fonte: Kennedy <i>et al.</i> , 2010. ....	20
Tabela 3 - Princípios para um metabolismo urbano sustentável.....	43
Tabela 4 - Indicadores e informações necessárias para o estudo do Metabolismo Urbano .....	49

# 1. Introdução

## 1.1 Apresentação do tema

O estudo do metabolismo urbano encara as cidades como organismos que necessitam de entrada de matéria, água e energia, estocam parte disto, emitem gases, e lançam efluentes e resíduos para fora de suas fronteiras. Entender este metabolismo, ver sua evolução com o tempo e comparar com o de outras cidades permite elaborar diretrizes que conduzirão a decisões para alcançar a sustentabilidade.

Existem muitos conceitos que buscam compreender os sistemas naturais e encontrar respostas para a construção dos sistemas humanos. Biomimética, ou imitação da vida, é o termo usado para se referir ao uso da natureza como modelo, medida e mentora na busca de soluções. Ecologia Urbana é a área que estuda as interações socioeconômicas das cidades com os ecossistemas em que se inserem. Há também o conceito de Ecologia Industrial que se utiliza de conceitos da ecologia para o projeto das atividades industriais. A simbiose urbana, por sua vez, deriva da simbiose industrial, um ramo da ecologia industrial, e pretende encontrar sinergias que permitam perceber as cidades como fonte alternativa de matéria-prima e energia. Por fim, temos também o conceito de metabolismo urbano que será aprofundado neste trabalho.

## 1.2 Objetivos

Tendo em vista as dificuldades impostas pela crescente urbanização que vivemos no mundo e diante de diversas abordagens que vem sendo estudadas para analisar questões ligadas à construção de cidades sustentáveis, este trabalho objetiva discutir e sistematizar os princípios relacionados ao tema do metabolismo urbano.

## 1.3 Justificativa

Hoje, 54 por cento da população mundial vive em áreas urbanas e espera-se que esse número chegue a 66 por cento em 2050 (UNRIC, 2014). Alcançar a sustentabilidade, então, dependerá de como nos organizaremos nos centros urbanos em crescimento. Uma consequência dessa urbanização é a segregação cada vez maior entre

os seres humanos e a natureza. Essa percepção afeta o modo como são conduzidas e organizadas as atividades humanas. As cidades contemporâneas funcionam como reatores lineares em que são consumidos recursos naturais, transformados e amplamente descartados a uma velocidade incompatível com a capacidade de reposição, gerando um impacto desproporcional à sua área. Por este motivo, incorporar o estudo do metabolismo urbano nos projetos para as cidades deve ajudar a identificar soluções mais circulares e sustentáveis no que diz respeito ao fluxo de matéria, água e energia.

## 1.4 Metodologia

A metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho baseou-se na revisão bibliográfica a partir de livros, monografias, relatórios técnicos e outras fontes que permitissem a compreensão da teoria que define as bases conceituais do metabolismo urbano, e na apresentação de métodos e ferramentas usados em estudos e experiências práticas consideradas como exemplos para identificar os princípios que devem guiar os projetos das cidades.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho se estrutura em cinco capítulos. O primeiro capítulo é composto pela introdução com a apresentação do tema, os objetivos, a justificativa, a metodologia empregada e a própria estrutura do trabalho.

O segundo capítulo discute a relação entre ambiente construído e ambiente natural e apresenta diversos conceitos que dialogam na busca de uma reaproximação com a natureza.

O terceiro capítulo trata especificamente do metabolismo urbano, apresentando sua origem, métodos e ferramentas e trazendo exemplos de aplicações em projetos. Nas últimas sessões do capítulo são discutidos a importância e os principais desafios identificados neste levantamento bibliográfico.

O quarto capítulo sistematiza os princípios para a obtenção de um metabolismo urbano sustentável e sugere alguns passos para a introdução destes princípios na construção de cidades.

Por fim, no quinto capítulo são elaboradas as conclusões, uma reflexão final sobre a relevância do tema e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. Cidades Sustentáveis: Abordagens que reaproximam Ambiente Construído e Ambiente Natural**

### 2.1 Cidades e Natureza

Apesar de ocuparem apenas cerca de 2 por cento da terra do mundo, as cidades consomem cerca de 75 por cento de seus recursos (Rodríguez, 2012). São grandes centros onde há trocas de mercadorias internacionais, onde os recursos fluem e onde são geradas grandes quantidades de lixo. A maioria das cidades contemporâneas funciona como reatores lineares. Seus metabolismos consistem em consumir bens e materiais de outro lugar, transformar em edificações, infraestrutura para água, energia, comunicação ou transporte e produzir resíduos que são amplamente descartados com reciclagem e reuso muito limitados. Ao longo do processo de urbanização a entrada de materiais supera a saída, resultando em um estoque crescente.

Todas as sociedades sempre usaram os recursos naturais para produzir mercadorias que dão bem-estar, de acordo com seu desenvolvimento cultural e econômico. Por milhares de anos os humanos foram caçadores e coletores. A transição para o Neolítico é definida pelo desenvolvimento de práticas agrícolas que se originaram e espalharam em diversas áreas há mais ou menos 10.000 anos (Ferrão e Fernández, 2013).

As sociedades agrícolas desenvolveram habilidades para administrar o ecossistema para aumentar a saída de biomassa útil, que usavam para comida e energia para aquecer, cozinhar e iluminar na forma de fogo. Esse modelo impôs uma limitação na capacidade de transportar combustível e comida por longas distâncias, com exceção das especiarias que possuíam alto valor econômico. Pode ser argumentado, segundo Ferrão e Fernández (2013), que esse fluxo de matéria, ou comércio, trouxe a economia global da Idade Média para os tempos modernos. As áreas urbanas eram associadas, então, a esses centros de troca e comércio.

A desconexão entre o homem e a natureza surge com o uso de máquinas, descobertas científicas e tecnológicas que diversificaram a produção. A emergência de

uma nova fonte de energia muito mais densa, os combustíveis fósseis, junto com a descoberta da máquina a vapor no final do século XVIII, levou à Revolução Industrial que transformou a economia baseada no trabalho humano em uma economia baseada nas máquinas e na agricultura.

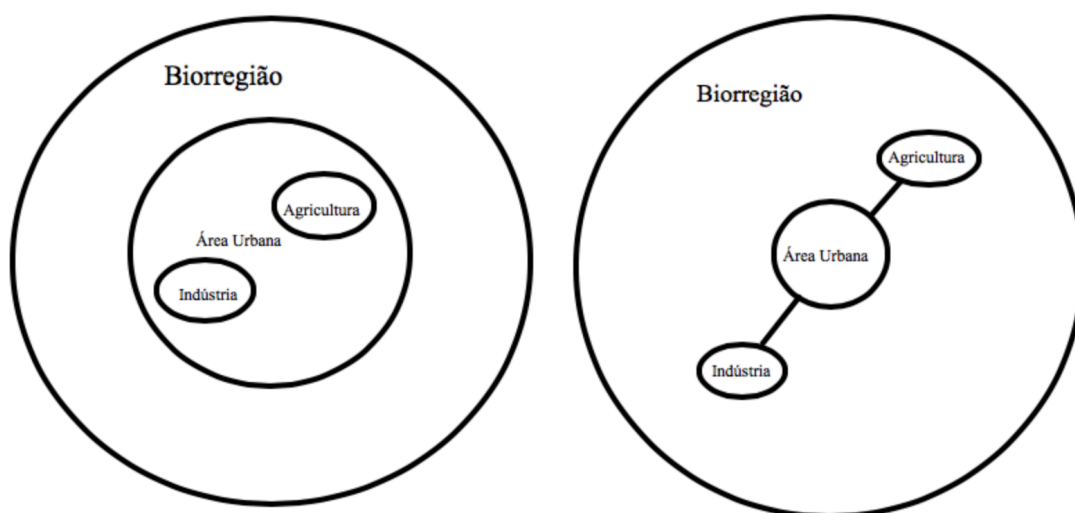
Durante os últimos 50 anos do século XX, o crescimento econômico e a mudança estrutural foram muito desiguais ao longo de diferentes países, mas mantiveram a seguinte característica: o consumo de materiais está diretamente relacionado ao crescimento econômico até que certo patamar seja atingido, quando a intensidade de material agregado da economia parece se estabilizar (Ferrão e Fernández, 2013).

A humanidade enfrentará grandes desafios nas próximas décadas, como a urbanização e a industrialização em países em desenvolvimento sem precedentes, as mudanças climáticas e o esgotamento de recursos naturais (Timothy e Müller, 2016).

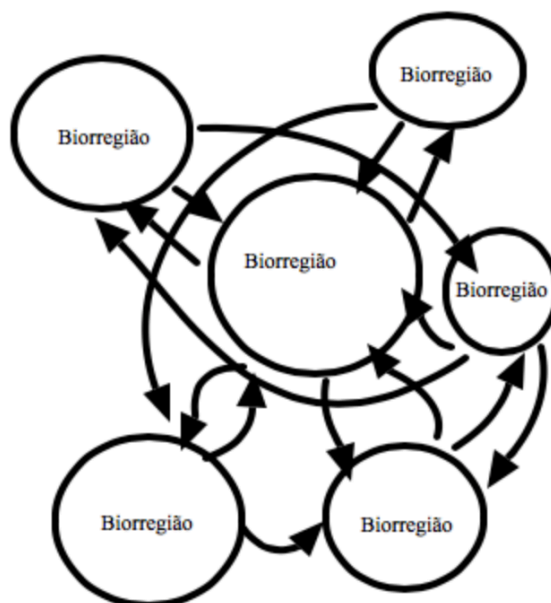
O grande desafio é que a industrialização e o aumento de renda estão associados ao uso intensivo de matéria e energia. Sendo assim, como permitir que os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento alcancem um certo nível de desenvolvimento e bem-estar para sua população que outros países aproveitaram por décadas e ao mesmo tempo entender os limites do ecossistema, do planeta e sua capacidade de suporte? Para isso, são necessárias mudanças de paradigmas, construídas com uma visão holística e considerando aspectos sociais, econômicos e ambientais.

Para compreender os sistemas urbanos, deve-se olhar para seu processo e fase da urbanização. As regiões que sustentam as áreas urbanas podem ser representadas como biorregiões (Ferrão e Fernández, 2013). As biorregiões são áreas que possuem características naturais exclusivas, como clima, relevo, solo, vegetação e outras. Na fase inicial da urbanização, as biorregiões moldam o desenvolvimento das cidades, e o sistema urbano pode ser representado contendo as atividades industriais e agricultura, como na Figura 1. Com o crescimento das cidades, o advento do comércio, a evolução dos sistemas de transporte e o adensamento populacional, tem-se, em geral, o distanciamento da indústria e da agricultura do centro urbano. O preço da terra no núcleo urbano aumenta e as preocupações ambientais transferem as atividades industriais para fora dos limites urbanos. O núcleo urbano se torna centro predominantemente das atividades culturais e de alto valor agregado, como comércio e serviços (Ferrão e Fernández, 2013).

A urbanização, juntamente com a economia globalizada, cria um complexo sistema de interações no qual os produtos consumidos nos núcleos urbanos podem vir de muito longe. Os produtos e bens produzidos pela indústria e pelas áreas agrícolas, ou até mesmo nos centros urbanos podem ser consumidos localmente ou exportados para outro sistema urbano, como no sistema de fluxos apresentado na Figura 2. Hoje, significativas proporções de até 64% dos impactos ambientais, sociais e econômicos podem ser relacionados ao comércio internacional (Wiedmann, 2016). Os bens exportados chegam a 35 vezes o volume das exportações de 1950 e, em média, as exportações fazem atualmente 30% do PIB de um país (Wiedmann, 2016).



**Figura 1 - (a) Sistema Urbano contido na biorregião (b) Evolução do sistema urbano com a criação de um núcleo . Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013.**



**Figura 2- Biorregiões e fluxos em uma economia global** Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013.

A consequência dessa evolução com o processo de urbanização é a perda do senso de disponibilidade física dos consumidores, que buscam seus produtos em lojas, mercados e centros comerciais, sem muitas informações sobre a origem e práticas utilizadas na produção dos mesmos. Os mecanismos econômicos e financeiros é que direcionam a sociedade moderna. Estes mecanismos são falhos ao incorporar os princípios da física, da natureza e até mesmo princípios básicos humanos e valores. As áreas urbanas são o retrato dessa sociedade e nelas pode-se investir em soluções para o desenvolvimento sustentável.

Viver nas cidades pode significar o acesso mais fácil à cultura, à educação e a atividades que valorizam a relação pessoal. São centros de inovação, de desenvolvimento tecnológico e de engajamento político. A urbanização tem sido percebida como fator de desenvolvimento socioeconômico, mas tem impactos negativos nos ecossistemas, na biodiversidade, no uso de recursos, poluição e saúde pública. O relatório da UN-Habitat (2016) enfatiza a interconexão das agendas ambientais locais e globais e as mudanças climáticas como sendo uma questão urbana revelando assim a urgência por soluções urbanas. Atingir a sustentabilidade dependerá, portanto, de como serão organizados os centros urbanos em crescimento. Isso depende do modo como são

conduzidas as análises dos sistemas urbanos, projetos e planejamento de suas múltiplas e complexas interações: econômica, social e ambiental.

Essa sustentabilidade, no contexto do desenvolvimento sustentável, pode ser entendida como: o aumento da qualidade de vida e bem-estar da população; o atendimento das necessidades das gerações presentes e futuras, considerando a equidade intra e intergeracional; a garantia de justiça e igualdade em termos de reconhecimento, processo, procedimento e resultado; e o reconhecimento dos limites dos ecossistemas e da necessidade de viver de acordo com as possibilidades do planeta (UN-Habitat, 2016).

Para reconhecer e viver de acordo com estes limites, algumas abordagens como a biomimética, a ecologia urbana, ecologia industrial, simbiose urbana e metabolismo urbano surgem para aprofundar o conhecimento dos sistemas naturais e aplicar suas estratégias de ciclagem de nutrientes e energia nos sistemas construídos pelo homem. Estas abordagens serão apresentados neste capítulo.

## 2.2 Biomimética

A palavra Biomimética vem do grego *bios*, que significa vida, e *mimesis*, que significa imitação (Benyus, 1997). O termo é utilizado para invenções humanas que sejam inspiradas pela natureza. Em seu livro Biomimética, Janine Benyus (1997) explica que o conceito busca usar a natureza como modelo, como medida, observando o padrão ecológico para correção das inovações, e como mentora, valorizando a diversidade sem esgotar a fonte de inspiração. Estudando a natureza, é possível aprender a solucionar problemas e criar inovações, pois, após 3,8 bilhões de anos de evolução, há uma inteligência de tentativa e erro que ultrapassa a capacidade de compreensão adquirida na relativa curta história como humanidade. A natureza aprendeu o que funciona, o que é adequado e o que é durável (Benyus, 1997). Observando e estudando a natureza, sem o foco de extrair seus recursos, podemos descobrir soluções para nossos problemas.

A Biomimética pode inspirar invenções em várias áreas, soluções para a agricultura, aproveitamento de energia, cura de doenças, armazenamento de informações e até mesmo na organização dos negócios. Entender o potencial dessa inspiração é conferir importância ao diálogo entre a biologia e a engenharia.

A Ecologia Industrial e o Metabolismo Urbano, tratados adiante, seriam, então, uma aplicação dos princípios da Biomimética para a organização de sistemas. Neste



tópico serão discutidas metáforas ecológicas, estratégias e aprendizados que podemos absorver do estudo de ecossistemas.

Um dos principais instrumentos do ecologista para medir e descrever a sustentabilidade dos ecossistemas é fazer um círculo em torno do sistema, contabilizar investimentos e produção e depois, analisar os ciclos de energia dentro do círculo. Muitas vezes os sistemas naturais, em matérias de energia, equilibram os fluxos, continuando viáveis sem esgotar os próprios recursos. Os melhores processos e sistemas são aqueles que a natureza criou (Benyus, 1997). Assim como os ecossistemas, na economia há o consumo de energia e de matéria-prima para a fabricação de produtos. O objetivo é buscar inspiração para que seja possível deixar de fazer isso de forma linear, operando como essa biologia de ciclos inesgotáveis e sustentada pela energia solar.

Após a Revolução Industrial, foi adotada uma estratégia que se aproxima de comunidades do tipo I, ou seja, aquelas que se instalam em estágio inicial de desenvolvimento dos sistemas. Elas consomem energia rapidamente para se reproduzir e seguir para outros lugares. Essa estratégia poderia ser vista como adequada no tempo em que os seres humanos eram nômades, porém atualmente ocupamos grande parte do planeta e, por isso, torna-se necessário aprender a renovar o que é usado no lugar em que se vive.

Para projetar sistemas, é interessante buscar os próximos estágios de desenvolvimentos dos sistemas ecológicos, em que o sol, a água e os nutrientes não são um fator limitante, pois há uma diversidade que garante sua auto-sustentabilidade. Janine Benyus (1997) faz em seu livro uma listagem das estratégias adotadas por todos os sistemas complexos e maduros, os sistemas do tipo III, como os prados, recifes de corais e florestas de sequoias:

1. Usam resíduos como recursos.
2. Diversificam-se e cooperam para o uso completo do habitat.
3. Assimilam e usam energia eficientemente.
4. Aperfeiçoam, em vez de explorar ao máximo.
5. Usam materiais parcimoniosamente.
6. Não sujam sua morada.
7. Não esgotam recursos.
8. Mantêm-se em equilíbrio com a biosfera.
9. Operam com base em informações.
10. Consomem os recursos do próprio habitat.

Exemplos da estratégia 1 aplicada aos sistemas humanos seriam a reciclagem, a compostagem, a logística reversa e a criação de produtos que possam ser reassimilados na cadeia produtiva.

Aplicando a estratégia 2 aos sistemas humanos, pode-se pensar em uma economia em que veia e artéria sejam ambas lucrativas. Além disso, criar parcerias e mecanismos econômicos que viabilizem o retorno dos materiais descartados pós consumo de volta para a produção.

O tópico 3 conduz à busca de soluções que otimizem em vez de maximizar a produção de energia.

Com a estratégia 5, devem-se criar estruturas que desempenham mais de uma função.

A estratégia 6 traz o questionamento sobre processos que poluem e sobre a vida útil dos produtos.

Pode ser extraída a mensagem, a partir da estratégia 9, da importância dos sistemas de informações na ciclagem da matéria e na utilização otimizada de recursos.

Segundo a estratégia 10, os projetos devem ser feitos em conjunto com pessoas especialistas em sua região, que a conheçam bem e saibam sobre seus recursos. A estratégia indica o empenho na criação de uma economia que se adapte à terra e aproveite seus atributos.

Quando se tratam de sistemas complexos, utilizar essas estratégias aumenta as chances de que eles sobrevivam e operem de forma otimizada. Uma boa inovação biomimeticamente inspirada, portanto, segundo Janine Benyus (1997), adota as seguintes decisões de projeto: funcionar com energia solar, usar apenas a energia que precisa, adaptar forma à função, reciclar tudo, recompensar a cooperação, apoiar-se na diversidade, funcionar com base em especializações autóctone, impedir excessos de dentro para fora, explorar o poder dos próprios limites e também ter beleza.

## 2.3 Ecologia Urbana

Ecologia Urbana é a área que está focada nos ecossistemas urbanos, procurando entender e moldar a interação entre as atividades socioeconômicas e os ecossistemas naturais (Ferrão e Fernández, 2013).

É o estudo dos ecossistemas que incluem cidades, a vida humana e paisagens urbanas. Trata-se de um campo emergente e interdisciplinar que busca entender como

processos humanos e ecológicos podem coexistir em sistemas predominantemente humanos. Algumas das disciplinas que fazem parte desse estudo são a sociologia, a geografia, a arquitetura, a engenharia, a economia, a antropologia, a ecologia, entre outras. O termo ecologia urbana normalmente é usado para descrever as relações entre humanos e a natureza (Marzluff et al 2008).

Segundo Andrade e Blumenschein (2014), a Ecologia Urbana tem, em sua literatura, dois significados: o primeiro é usado para instalações ambientais em espaços urbanos e o segundo, para os estudos da distribuição e abundância de organismos e de processos biogeoquímicos nas áreas urbanas.

O estudo da Ecologia Urbana avançou do estudo dos espaços verdes da cidade, ou ecologia “na” cidade, para a abordagem atual em que a área inteira urbana é vista como um ecossistema urbano, dita ecologia “da” cidade. A ecologia “na” cidade estuda os padrões e processos ecológicos que ocorrem em ambientes urbanos e compara-os com os de outros ambientes. Por esta vertente, são vistos apenas os impactos da urbanização em sistemas naturais remanescentes nas cidades. Pela vertente da ecologia “da” cidade, são estudadas as interações entre os sistemas sociais e ecológicos e os projetos são pensados para manter um ecossistema urbano saudável. A cidade é vista como um sistema e o foco do estudo está nas interações entre componentes sociais, biológicos, físicos e do ambiente construído (Andrade e Blumenschein, 2014).

## 2.4 Ecologia Industrial

Assim como vimos no campo da biomimética, a metáfora da ecologia industrial também sugere que se olhe para a natureza como fonte de ideias sobre como projetar sistemas para a sustentabilidade. Os ecossistemas oferecem oportunidade de aprender observando comunidades ecológicas robustas e resilientes como exemplos.

O primeiro uso do termo “Ecologia Industrial” data de 1989, no artigo de referência de Frosch e Gallopoulos. A Sociedade Internacional de Ecologia Industrial adotou a definição de White, de 1994 : “o estudo do fluxo de matéria e energia nas atividades industriais e de consumo, dos efeitos desse fluxo no meio ambiente e das influências de fatores políticos, regulatórios e sociais no fluxo, uso e transformação de recursos” (Graedel e Lifset, 2016).

Outra definição é “o estudo dos organismos tecnológicos, seus usos de recursos, seus potenciais impactos ambientais e maneiras nas quais suas interações com o mundo natural podem ser reestruturadas para possibilitar a sustentabilidade global” (Iveroth, 2014). Como pode-se perceber pelas definições, a ecologia industrial é um campo de estudos bastante abrangente e multidisciplinar.

A ecologia industrial mostra que devemos nos esforçar para projetar sistemas a partir de três características da metáfora ecológica: comunidade, conectividade e cooperação. A sociedade de consumo não considera o princípio de suficiência, princípio também considerado pela ecologia industrial e grande diferencial da abordagem (Ferrão e Fernández, 2013).

Em sua abordagem são considerados os fluxos de materiais e energia nos processos industriais e de consumo, estudando as interações com o meio ambiente e as interferências dos contextos social, político e econômico. Como resultado, sua aplicação pode ser para a otimização de sistemas de processamento de produtos em fim de vida, para pesquisas operacionais considerando os impactos dos ciclos de vida dos produtos, para cálculos de emissões de gases de efeito estufa, para o desenvolvimento do ecodesign, para projetos de parques industriais e para análises de metabolismo.

O campo interdisciplinar da Ecologia Industrial pode ser mais amplamente entendido como o estudo de três tipos de metabolismo – o industrial, o socioeconômico e o urbano (Kennedy, 2016). A abordagem do metabolismo ajuda a medir a intensidade de recursos utilizados pelo sistema urbano e o grau de circularidade dos fluxos. Para entender este metabolismo e como intervir nos sistemas urbanos de forma a torná-los mais sustentáveis, é necessária uma visão holística das complexas interações e dinâmicas dentro desse ambiente.

Um princípio básico do desenvolvimento do estudo da ecologia industrial é tentar trabalhar, sempre que possível, com substâncias que a natureza reconheça e possa assimilar (Benyus, 1997).

As ferramentas da ecologia industrial apresentam métodos e modelos científicos que fornecem indicadores para tomadas de decisão. As macro ferramentas mais relevantes são a Pegada Ecológica, a Análise de Fluxo de Matéria (MFA) e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (Ferrão e Fernández, 2013) que serão explicadas no capítulo seguinte, pois podem ser aplicadas para sistemas urbanos.

## 2.5 Simbiose Urbana

A Simbiose Urbana deriva do conceito de Simbiose Industrial, que foi introduzido para melhorar a performance de áreas industriais, e representa o ramo da ecologia industrial que engaja entidades tradicionalmente separadas em uma abordagem coletiva. Essa abordagem coletiva gera uma vantagem competitiva envolvendo a troca física de materiais, energia, água e subprodutos (Iveroth, 2014). O conceito foi introduzido por Van Berkel et al. (2009), referindo-se à integração dos sistemas de infraestrutura das cidades para o uso de seus subprodutos, como o lixo e energia secundária, como fonte alternativa para matéria-prima e energia primária (Iveroth, 2014).

A base da simbiose urbana é criar sinergias, observando as oportunidades da proximidade geográfica da fonte dos resíduos urbanos e potenciais usos industriais. É usada para permitir o transporte de recursos físicos desses resíduos de modo a gerar um benefício econômico e ambiental (Iveroth, 2014).

## 2.5 Metabolismo Urbano

O metabolismo de um ecossistema é definido pelos ecologistas como a produção, via fotossíntese, e consumo de matéria orgânica, via respiração. Geralmente, o metabolismo é expresso em termos de energia (Kennedy *et al.*, 2007).

O conceito de metabolismo urbano deriva diretamente da aplicação da ecologia industrial para sistemas urbanos. Segundo Kennedy *et al.* (2010), o metabolismo urbano pode ser definido como a soma total de processos técnicos e socioeconômicos que ocorrem nas cidades, resultando em crescimento, produção de energia e eliminação de resíduos. Esse metabolismo pode ser analisado, de acordo com Kennedy *et al.* (2007), em termos de quatro fluxos fundamentais: água, materiais, energia e nutrientes.

Apesar de compartilharem os mesmos princípios, o estudo do metabolismo urbano tem sua própria literatura originalmente separada da ecologia industrial. O primeiro estudo que reconhece o termo da ecologia industrial é o de Sydney por Peter Newman em 1999 (Kennedy, 2016).

Cada sistema urbano possui características específicas de um contexto cultural e socioeconômico e de um conjunto de infraestruturas que juntos determinam sua

interação com a natureza, particularmente como acontecem a troca de matéria e de energia. A abordagem do metabolismo urbano mede a intensidade necessária de recursos para a economia, seu grau de circularidade e pode ser usada como ferramenta para guiar o projeto sustentável.

O estudo metabólico do espaço urbano também pode contribuir com a avaliação de impacto ambiental de projetos potencialmente poluidores e com a compreensão dos efeitos de empreendimentos. Para realizar os estudos, deve-se selecionar uma região da cidade e identificar seus maiores problemas (transporte, moradia, energia, qualidade do ar, entre outros). Em seguida, é necessário estudar os principais índices metabólicos – poluentes atmosféricos, água e energia – e analisar como eles serão levados em conta nos processos de decisão de projetos (Carvalho e Costa, 2015).

Os campos mencionados neste trabalho e que contribuem para o estudo do metabolismo urbano são a biomimética, a ecologia industrial, a simbiose industrial e a engenharia e pesquisa ambiental. Estes campos contribuem diretamente para o estudo, formulando conceitos, métodos e ferramentas para o desenvolvimento de estratégias para cidades sustentáveis. Outros campos, como o da ecologia urbana, ajudam a entender o futuro das cidades, com contribuições indiretas, porém importantes para o estudo.

## 2.6 Síntese

A seguir foi preparado um quadro síntese dos conceitos apresentados neste capítulo e suas relações. Pode-se observar, na Tabela 1, que todas estas abordagens dialogam para a busca da sustentabilidade por meio de estratégias baseadas em metáforas ecológicas e estudos dos fluxos de matérias e energia para sua otimização e harmonização com os ciclos naturais.

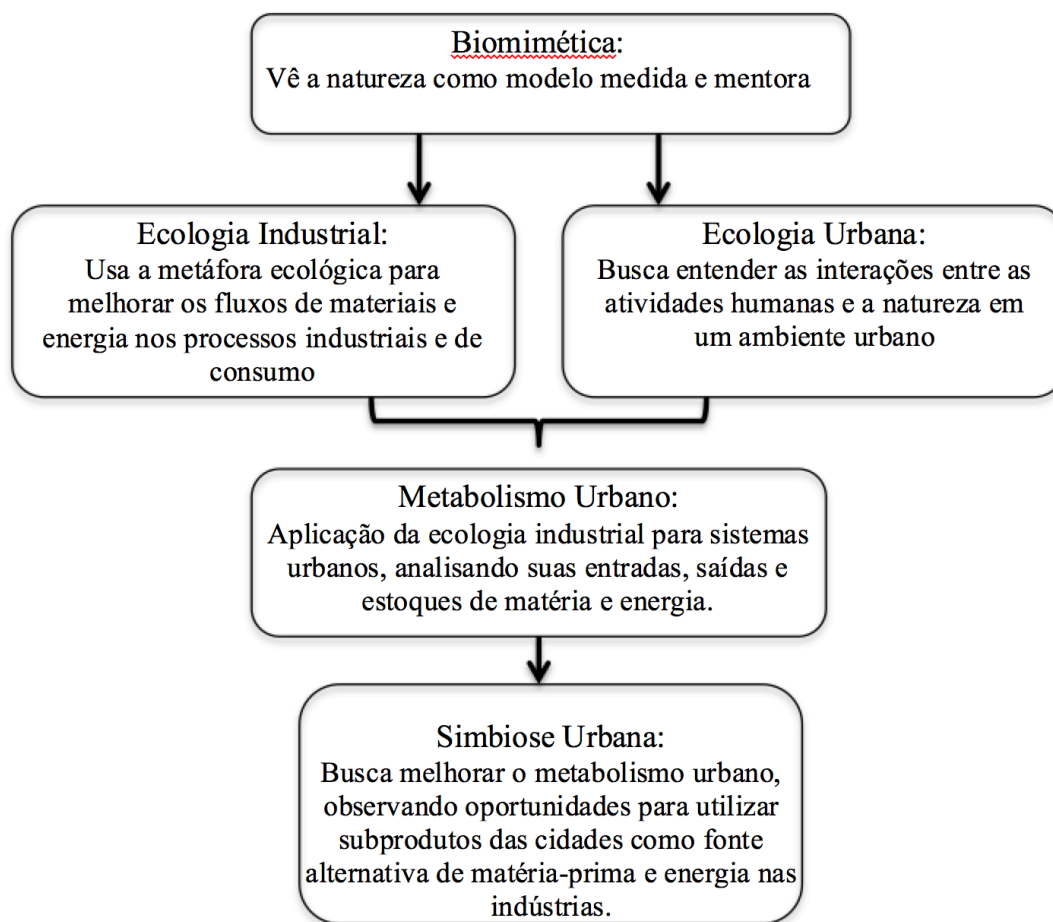


Tabela 1 - Quadro sinóptico de conceitos

### 3. Metabolismo Urbano como ferramenta para a sustentabilidade

O conceito de metabolismo urbano é atribuído ao artigo de Wolman de 1965. O artigo embasou pesquisadores para uma avaliação quantitativa do fluxo de energia e recursos da cidade. Ele quantificou as entradas e saídas de energia, água, materiais e resíduos de uma região hipotética Americana com uma população de 1 milhão de habitantes (Mostafavi *et al.*, 2013). Ele definiu, como entradas, água, energia e alimentos e, como saídas, esgoto sanitário, resíduos sólidos e poluentes atmosféricos. O estoque é o que fica retido no processo metabólico da cidade, usado para gerar os produtos e serviços capazes de oferecer a seus habitantes moradia, trabalho, cultura e lazer (Carvalho e Costa, 2015).

Desde então, muitos pesquisadores conduziram estudos usando diferentes

perspectivas, metodologias e estruturas de avaliação.

Acsehrad (2005) apresenta uma divisão de tratamento da questão da sustentabilidade urbana em dois tipos: “um tratamento normativo, empenhado em delinear o perfil da “cidade sustentável” a partir de princípios do que se entende por um urbanismo ambientalizado; e um tratamento analítico, que parte da problematização das condições sociopolíticas em que emerge o discurso sobre sustentabilidade aplicado às cidades”.

Mostafavi *et al.* (2013) também argumentam que há duas estruturas de abordagem dos estudos de metabolismo: uma com foco em métodos qualitativos, no contexto das ciências políticas, e outra com métodos quantitativos. Os métodos quantitativos também seguem duas vertentes, a da energia e a de fluxo de massa.

O conceito de energia vem dos anos 70, quando o metabolismo urbano estava sendo estudado por uma perspectiva que estava interessada em definir energia solar equivalente. A energia solar equivalente é um valor biofísico que pode ser usado tanto para sistemas ecológicos quanto para sistemas econômicos. Esse conceito tem raízes na termodinâmica e na teoria de sistemas. Energia é uma expressão para toda energia e recursos usados para gerar produtos e serviços.

A principal corrente observada nos estudos, no entanto, utiliza unidades mais práticas para que possam ser usadas e compreendidas pelos governos locais. As duas escolas, a da energia e a do fluxo de massa, quantificam os mesmos elementos, porém usando unidades diferentes (Kennedy *et al.*, 2010).

O artigo de Kennedy *et al.* (2010) apresenta a evolução das abordagens metodológicas para o estudo do metabolismo urbano que pode ser vista na Tabela 2 (Kennedy *et al.*, 2010).

Um dos primeiros estudos quantitativos foi o de Newcombe *et al.* sobre a análise de fluxo de recursos em Hong Kong em 1978 (Graedel e Lifset, 2016). Alguns estudos analisaram o metabolismo estudando questões relacionadas à água, investigando aplicações de reuso de efluentes e correlacionando a aplicação do reuso com padrões de consumo. A importância dos balanços hidrológicos como ferramentas de gestão urbana da água também foi apresentada em outros estudos (Mostafavi *et al.*, 2013).

Estudos sobre o fluxo de nutrientes são menos comuns, e focam em substâncias como nitrogênio e fósforo. Estudos específicos de substâncias, como alguns metais, também podem ser percebidos na tabela.

Kennedy *et al.* (2007) conduziram uma revisão dos estudos de metabolismo



urbano com foco no entendimento de como o metabolismo estava mudando. O estudo revela que, de forma geral, o metabolismo das cidades está aumentando. No entanto, alguns sinais mostram o aumento da eficiência. Por exemplo, há redução no uso de energia per capita e nivelamento da demanda de água em Toronto nos anos 1990s. Os estudos dos nutrientes são exemplos de análises mais específicas focadas em determinadas substâncias. Esses estudos mostram que, em geral, os nutrientes estão se acumulando nas cidades. Em termos de massa, a água é definitivamente o maior componente do metabolismo urbano.

Mostafavi *et al.* (2013) afirma que o conceito de metabolismo urbano evoluiu ao longo do tempo. Indicadores de qualidade de vida também foram incluídos neste conceito. Para ilustrar esta evolução são mencionados os estudos do metabolismo de Sydney por Newman e colegas que estendem o modelo de metabolismo urbano para considerar indicadores de empregabilidade, saúde, habitação, educação, renda, lazer e atividades comunitárias. Stimson *et al.* (1999) também é citado por somar a habitabilidade e viabilidade a longo prazo à sustentabilidade ambiental.

Author (year)	City or region of study	Notes/contribution
Wolman (1965)	Hypothetical US city of 1 million people	Seminal study
Zucchetto (1975)	Miami	Emergy approach
Stanhill (1977); Odum (1983)	1850s Paris	Emergy approach
Hanya and Ambe (1976).	Toyko	
Duvigneaud and Denayeyer-De Smet (1977)	Brussels	Includes natural energy balance
Newcombe et al. (1978); Boyden et al. (1981)	Hong Kong	Particularly comprehensive metabolism study
Girardet (1992)		Recognized link to sustainable development of cities
Bohle (1994)		Critiqued metabolism perspective for studying food in developing cities
European Environment Agency (1995)	Prague (comprehensive metabolism study)	Energy use data for Barcelona and seven other European cities given in the report.
Nilson (1995)	Gävle, Sweden	Phosphorus budget
Baccini (1997).	Swiss Lowlands	
Huang (1998).	Taipei	Emergy approach
Newman (1999); Newman et al. (1996)	Sydney	Adds liveability measures
Stimson et al. (1999)	Brisbane & Southeast Queensland	Framework relating urban metabolism to quality of life.
Hermanowicz and Asano (1999)		Water
Hendriks et al. (2000).	Vienna & Swiss Lowlands	
Warren-Rhodes and Koenig (2001).	Hong Kong	
Baker et al. (2001)	Phoenix & Central Arizona	Nitrogen balance
Sörme et al. (2001)	Stockholm	Heavy metals
Svidén and Jonsson (2001)	Stockholm	Mercury
Obernosterer and Brunner (2001)	Vienna	Lead
Færge et al. (2001)	Bangkok	Nitrogen & Phosphorus
Chartered Institute of Wastes Management (2002)	London	
Gasson (2002)	Cape Town	
Barrett et al. (2002)	York, UK	Materials
Obernosterer (2002)		Metals
Sahely et al. (2003).	Toronto	
Emmenegger et al. (2003)	Geneva	
Burström et al. (2003)	Stockholm	Nitrogen & Phosphorus
Gandy (2004)		Water
Lennox and Turner (2004)		State of the Environment report
Hammer and Giljum (2006)	Hamburg, Vienna and Leipzig	Materials
Kennedy et al. (2007)		Review of changing metabolism
Schulz (2007)	Singapore	Materials
Barles (2007a)	Paris	Historical study of nitrogen in food metabolism
Forkes (2007)	Toronto	Nitrogen in food metabolism
Zhang and Yang (2007)	Shenzhen, China	Develops eco-efficiency measure
Ngo and Pataki (2008)	Los Angeles	
Chrysoulakis (2008)		New project under EU 7th framework
Schremmer and Stead (2009)		New project under EU 7th framework
Barles (2009, 2007b)	Paris	Analysis of central city, suburbs and region.
Zhang et al. (2009)	Beijing	Emergy approach
Niza et al. (2009)	Lisbon	Materials
Deilmann (2009)		Studies relationship between metabolism and city surface
Baker et al. (2001)		Water
Thériault and Laroche (2009)	Greater Moncton, New Brunswick	Water
Browne et al. (2009)	Limerick, Ireland	Develops measure of metabolic efficiency

**Tabela 2 - Estudos sobre metabolismo urbano. Fonte: Kennedy *et al.*, 2010.**

Estudos mais amplos tentam conectar o metabolismo urbano com os ecossistemas, o acúmulo de materiais tóxicos, encontrar uma economia de escala para infraestrutura urbana, quantificar as emissões de gases de efeito estufa em cidades globais, observar atributos espaciais do metabolismo urbano, relacionar os ciclos biogeoquímicos e relacionar modelos macroeconômicos ao metabolismo (Kennedy *et al.*, 2010).

A relevância do tema vem sendo cada vez mais reconhecida na busca de ferramentas de avaliação. Uma pesquisa mostra que o número de publicações sobre metabolismo urbano cresceu nos últimos 15 anos. Até o começo dos anos 2000 eram de aproximadamente dois artigos por ano e esse número aumentou para 47 em 2014 (Kennedy, 2016).

### 3.1 Métodos e Ferramentas

Os sistemas urbanos são caracterizados por muitos subsistemas que estão interligados – técnicos, sociais, econômicos, institucionais – e que interagem com o meio ambiente consumindo matéria e energia, acumulando e lançando rejeitos e emissões para a água, solo e ar. Como visto anteriormente, o metabolismo urbano pode ser analisado em termos de quatro fluxos fundamentais: água, materiais, energia e nutrientes.

Alguns fatores que influenciam esse metabolismo são: o nível de atividade econômica; o clima; o acesso à infraestrutura de transporte; a forma urbana – densidade, morfologia –, que determina a energia per capita necessária para o transporte; o desenvolvimento tecnológico; a cobertura vegetal; os códigos de construção; o custo da energia; e políticas e infraestrutura da gestão de resíduos sólidos (Ferrão e Fernández, 2013). As variações também podem ser atribuídas à idade, ao estágio de desenvolvimento da cidade e a fatores culturais (Kennedy *et al.*, 2007).

As principais ferramentas da ecologia industrial aplicadas a espaços urbanos são: quadro econômico de entrada-saída, Análise do Fluxo de Material (AFM), Pegada Ecológica e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

#### 3.1.1 Quadros econômicos de entrada-saída

Os métodos de quadros econômicos de entrada-saída são baseados em tabelas de entrada e saída que descrevem o comércio, compra e venda, e relações entre diferentes setores econômicos de determinada região. Os métodos foram desenvolvidos por Wassily Leontiel (1906-1999). Podem ser usados para prever e planejar a produção dos setores econômicos baseados na demanda. Podem também ser estendidos para análises ambientais (Ferrão e Fernández, 2013).

#### 3.1.2 Análise de Fluxo de Materiais

A Análise de Fluxo de Materiais (AFM) é uma metodologia para caracterizar o fluxo de matéria que entra, acumula-se e deixa um sistema em um determinado período de tempo. É uma família de modelos que sistematizam a medida física de específicos fluxos de materiais para o monitoramento, análise e gestão ambiental. Os modelos são

baseados em matrizes de composição de produtos e resíduos. A composição dos produtos são geralmente dadas por pesquisas industriais ou informações dos fabricantes e recicladoras. As categorias de materiais podem seguir a EUROSTAT, Oficina Estatística da União Europeia, sendo elas biomassa, combustíveis fósseis, minerais metálicos e não metálicos. Na escala urbana, não existe uma metodologia padronizada equivalente à aplicada pela EUROSTAT (Rodríguez, 2012). Uma outra nomenclatura chamada “MatCat” foi proposta por Rosado (2012) e subdivide os materiais em mais classes (Ferrão e Fernández, 2013).

Para ilustrar a metodologia de Análise de Fluxo de Materiais, o estudo de metabolismo urbano realizado em Lisboa por Niza *et al.* em 2009 pode ser usado como referência (Ferrão e Fernández, 2013), pela abordagem metodológica feita ali e descrita a seguir.

A metodologia usada foi baseada na Análise de Fluxo de Materiais da EUROSTAT com dados de entrada, como extração doméstica de recursos e importação de matéria-prima e de produtos e dados de saídas como emissões, resíduos e exportação de matéria-prima e de produtos. Foi assumido que todos os materiais consumidos em Lisboa foram importados de fora de seus limites. O fluxo do porto da cidade não foi contabilizado em seu metabolismo. A metodologia permitiu a caracterização das seguintes variáveis:

- Consumo absoluto e disposição final de materiais por categoria
- Taxa de transferência de materiais por categoria
- Consumo de materiais por setor de atividade
- Tratamento de resíduos por categoria de resíduos e tipo de tratamento

Cada uma dessas variáveis foi calculada algebricamente por meio das seguintes matrizes:

#### 1. Matriz de Materiais

$$M = A_{ij} \times P_{jk} \times L_{kl}$$

Em que:

$A_{ij}$  é a matriz de composição de produtos, onde  $i$  são as categorias de materiais e  $j$  são os produtos. Determina a composição de cada produto e cada resíduo por categoria de material em porcentagem de massa.

$P_{jk}$  é a matriz de fluxo de massa, onde  $j$  são os produtos e  $k$  são as quantidades de

massa. É uma matriz diagonal, ou seja, quando  $j=k$ ,  $P$  representa a quantidade de massa do produto que entra na cidade.

$L_{kl}$  é a matriz quota, onde  $k$  são as porcentagens de massa de produtos ou resíduos e  $l$  são os produtos. Também é uma matriz diagonal. Quando  $k=l$ , define-se a fração de cada produto e resíduo que é consumido e gerado na cidade.

A matriz  $M$  resultará no total de materiais que entra ou deixa o sistema urbano em toneladas por ano.

## 2. Matriz de Taxa de Transferência

$$T = M \times R_{ij}$$

Em que:

$M$  é a matriz de materiais e  $R_{ij}$  é a matriz de vida útil dos produtos, onde  $i$  representa categorias de vida útil dos produtos e  $j$  representa os produtos.

## 3. Matriz de Resíduos

$$W = V_{im} \times X_{mn} \times T_{ms}$$

Em que :

$V_{im}$  é a matriz de composição dos resíduos, onde  $i$  são as categorias de materiais e  $m$  são os resíduos. Determina a composição de cada resíduo por categoria de material, em porcentagem.

$X_{mn}$  é a matriz de fluxo de resíduos, onde  $m$  são os resíduos e  $n$  são as quantidades de massa.

$T_{ms}$  é a matriz de categoria de tratamento, onde  $m$  são os resíduos e  $s$  são os tipos de tratamento.

## 4. Matriz de Setores de Atividades

$$S = M \times S_{ih}$$

Em que:

$M$  é a matriz de materiais e  $S$  é a matriz de produtos por setor, onde  $i$  representa os produtos e  $h$  representa as categorias de setores de atividades.

Para fechar o balanço de entrada saída e estoque, emissões de queima de combustíveis fósseis, parcela sólida do esgoto e resíduos da construção e demolição foram calculados.

Um desafio da implementação da AFM é que os impactos ambientais dos fluxos de materiais incluem o consumo, mas também os processamentos pós consumo, como a disposição de resíduos. As vulnerabilidades do ecossistema também dependem de fatores geográficos. Para superar estes desafios, alguns estudos aplicaram técnicas de

pegada ecológica para avaliar o metabolismo das cidades (Mostafavi *et al.*, 2013). A Pegada Ecológica é um dos métodos de AFM que quantifica as terras produtivas e a área marinha, em hectares globais, necessárias para produzir os serviços e os produtos de que precisamos. A Pegada Ecológica é uma metodologia de contabilidade ambiental que avalia a pressão do consumo das populações humanas sobre os recursos naturais. Ela permite comparar diferentes padrões de consumo e verificar se estão dentro da capacidade ecológica do planeta. Um hectare global significa um hectare de produtividade média mundial para terras e águas produtivas em um ano (WWF).

### 3.1.3 Avaliação do Ciclo de vida

Por fim, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma modelagem das entradas e saídas de fluxo e energia de um produto ou serviço em todo seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima, transporte, fabricação, uso, até sua destinação final (ABNT NBR ISO 14040:2009).

Outra ferramenta também usada é a *Network Environ Analysis*, metodologia quantitativa para descrever um objeto contido em seu ambiente. A ferramenta permite uma perspectiva do meio ambiente baseada em teoria de sistemas e análises de entrada e saída. Trata-se de um tipo de abordagem conceitual denominada Análise de Rede Ecológica (*ecological network analysis*) (Patten, 1978).

### 3.1.4 Índice de Sustentabilidade pela Emergia

Ao avaliar um sistema por meio da emergia, é possível reconhecer três principais fluxos: fluxos renováveis internos, fluxos não renováveis internos e fluxos importados. Os fluxos renováveis internos têm fluxo limitado, são livres e disponíveis localmente. Os fluxos não renováveis internos têm estoque limitado, não são sempre livres e estão disponíveis localmente. Os fluxos importados, por sua vez, têm estoque limitado, nunca são livres e nunca estão disponíveis localmente.

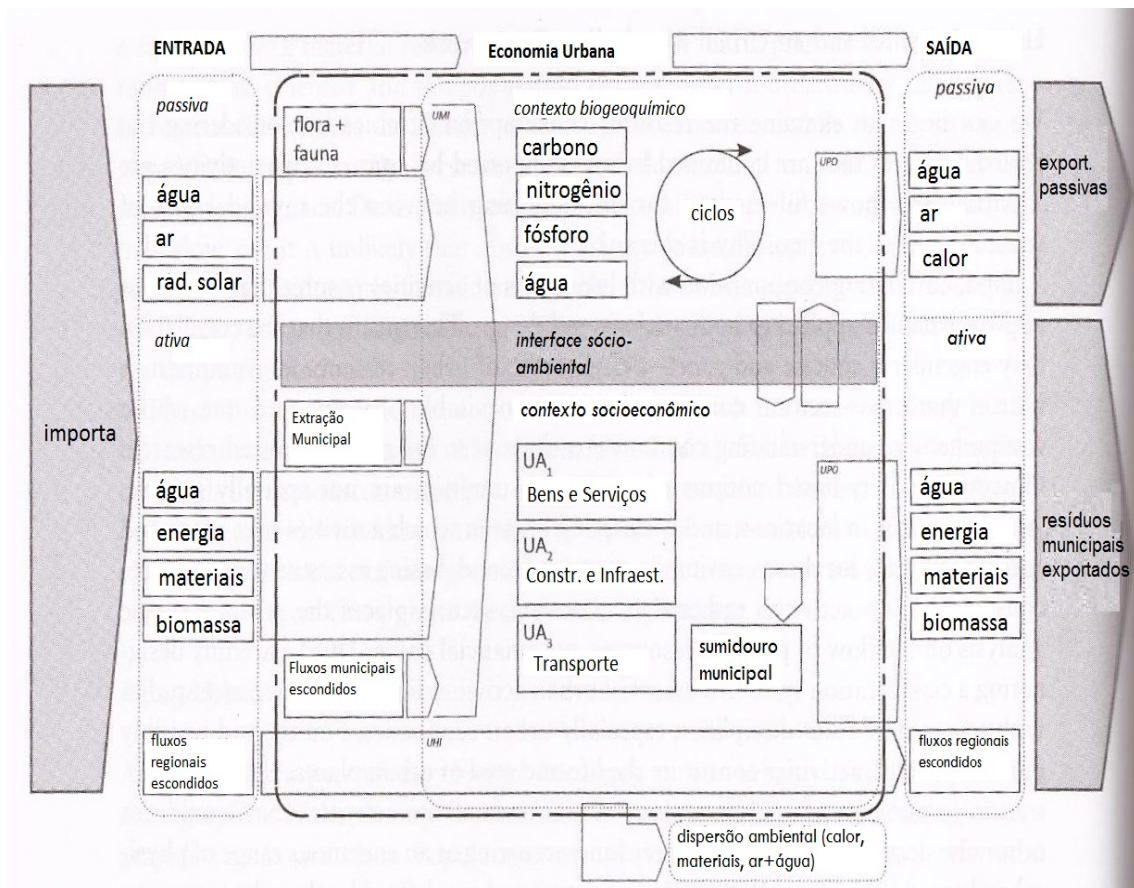
Estes fluxos permitem calcular diversos índices úteis para a avaliação da sustentabilidade de um sistema como a razão de carregamento ambiental (fluxos não renováveis e importados sobre os fluxos renováveis) e a taxa de rendimento de emergia (saída de emergia sobre entrada de emergia). O índice de sustentabilidade pode ser obtido por meio destes indicadores para avaliar se um sistema consegue oferecer

serviços ao usuário sem causar pressão ao meio ambiente. Este índice de sustentabilidade é calculado pela razão entre a taxa de rendimento de energia e a razão de carregamento ambiental (Siracusa *et al.*, 2007).

### 3.1.5 Estruturas do Metabolismo

Pela vertente que avalia o fluxo de massa dos sistemas, pode ser usada uma estrutura voltada para três tipos de atividades urbanas (1) a provisão de espaço habitável, (2) a provisão de bens e serviços de todos os tipos (produtos) e (3) a provisão do movimento de bens e pessoas (transporte) (Ferrão e Fernández, 2013). As relações entre essas atividades determinam o equilíbrio espacial das cidades e permitem que modelos incorporem os aspectos econômicos do desenvolvimento urbano juntamente com os modelos de consumo de recursos, considerando os processos biogeoquímicos como mostra a Figura 3.

A modelagem simplificada desses sistemas e processos pode ilustrar o fluxo de energia e matéria por atividade socioeconômica, as relações que caracterizam os processos biogeoquímicos e as interações primárias entre as atividades socioeconômicas e biogeoquímicas, usando modelos de fluxo e estoque junto com o modelo de dinâmica de sistemas. Fornece também uma orientação para delinear comportamentos positivos e negativos da zona urbana. (Ferrão e Fernández, 2013)

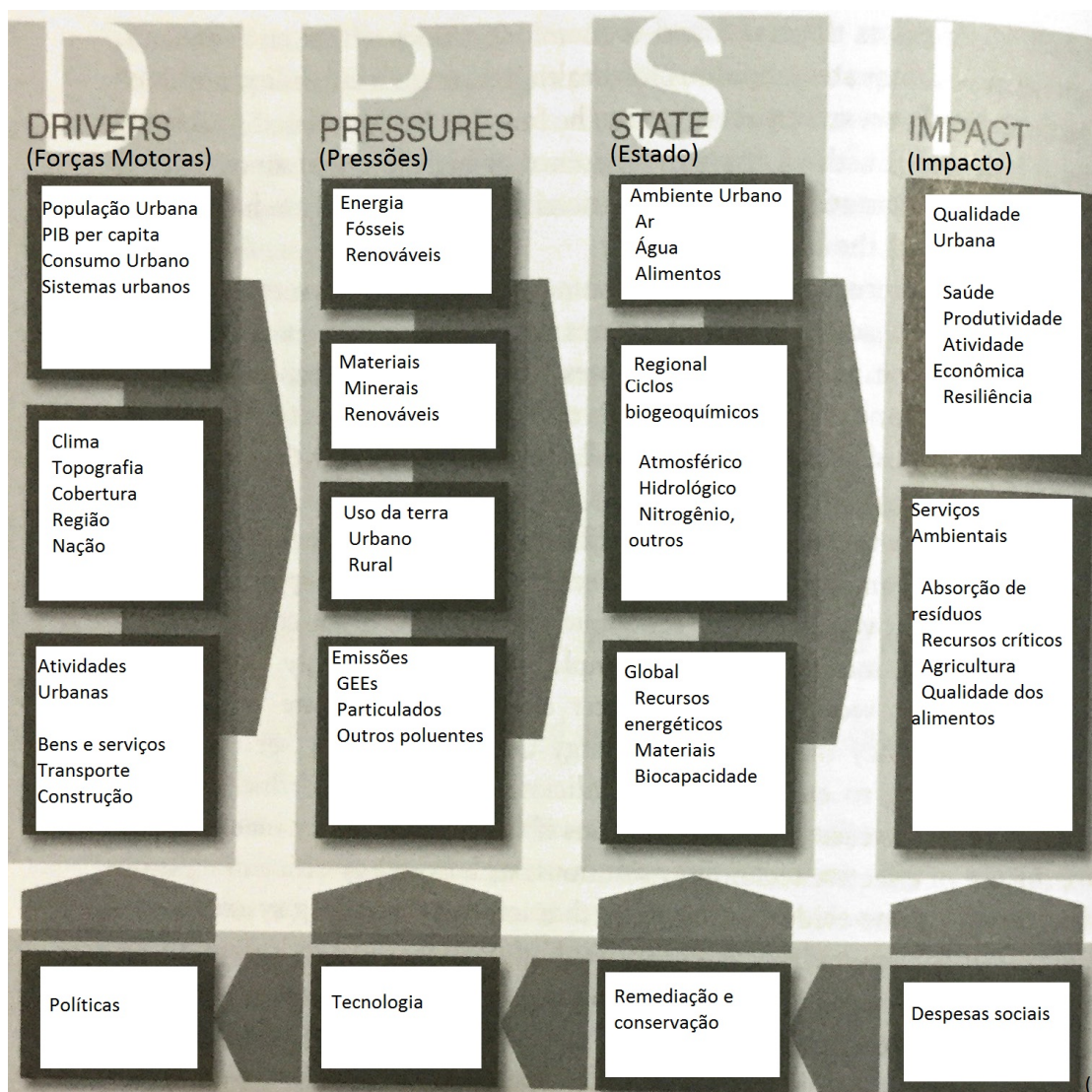


**Figura 3 - Estrutura do Metabolismo Urbano. Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013.**

A partir do levantamento bibliográfico, foram identificadas várias metodologias de avaliação do metabolismo urbano, desde estruturas conceituais, estudos de indicadores até plataformas de modelagem matemáticas desenvolvidas. Algumas plataformas de modelagem são o SIMBOX e o STAN (Kennedy *et al.*, 2010).

Ferrão e Fernández (2013) propõem uma abordagem a partir do modelo conceitual DPSIR (*drivers-pressures-state-impact-response* ou Forças Motoras-Pressão-Estado-Impacto-Resposta) que fornece uma estrutura de indicadores úteis para o entendimento do metabolismo urbano. Esses modelos são uma extensão do PSR (*pressure-status-response*), desenvolvido pela Organização Europeia para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (1993). Essa extensão foi feita pela Agência Ambiental Europeia em 1999. A aplicação prática do modelo é baseada em quantificar cada elemento DPSIR e especificar as várias relações entre eles. Na Figura 4 podemos ver a estrutura aplicada para o metabolismo urbano.





**Figura 4 - Estrutura DPSIR para metabolismo urbano . Fonte: Traduzido de Ferrão e Fernández, 2013**

As forças motoras trazem pressão ao meio ambiente e, como resultado, o estado se altera. Essas mudanças têm impactos nos ecossistemas e na saúde humana. Devido a esses impactos, a sociedade apresenta uma resposta às forças motoras ou diretamente aos outros elementos, criando soluções preventivas e adaptativas.

As forças motoras incluem atributos da sociedade. Este elemento delinea e caracteriza a população. As pressões no meio ambiente são funções do nível das atividades e das tecnologias aplicadas. As respostas influenciam as interações entre as forças motoras e as pressões.

As relações entre pressões e estado podem ser descritas por meio de modelos empíricos baseados em dados e monitoramento, ou analíticos, construídos por modelagem física, química e ecológica.

Indicadores que relacionam estado ao impacto esboçam as formas como o meio ambiente e os serviços ecossistêmicos são dependentes de uma complexa teia de condições.

Os indicadores que relacionam as respostas às forças motoras, reiniciando o ciclo, são o elemento crítico da utilidade do modelo. Eles proporcionam um desenvolvimento de mecanismo de feedback que pode impedir um efeito de rebote causado pela ausência de informação, como por exemplo, o aumento do consumo de energia junto com o aumento da eficiência energética.

O artigo de Mostafavi *et al.* (2013), por sua vez, desenvolve uma ferramenta de análise integrada do metabolismo urbano (IUMAT). Para a avaliação da sustentabilidade é usada uma abordagem que considera os capitais econômico, social e ambiental. Conectando com informações geográficas e temporais, é possível entender as tendências e processos de transformação para escolher soluções que melhorem os sistemas urbanos.

O artigo propõe a avaliação de cinco principais indicadores de metabolismo urbano: uso da terra, consumo de energia, fluxo de materiais, água e recursos e qualidade do ar. Usando uma matriz de variáveis, a análise do metabolismo vai visar o consumo de água, de material, a produção de esgoto e resíduos, o uso de energia, as emissões atmosféricas e o efeito de ilhas de calor nas regiões urbanas sob cenários diferentes. Estes indicadores serão vistos em diferentes setores de áreas e/ou atividades urbanas (residencial, comercial, industrial, educacional, governamental, transporte e espaços públicos) baseados no tipo, localização, ocupação etc. das construções e em outros indicadores que são relacionados à qualidade de vida como renda e educação. O modelo é explicado na Figura 5.

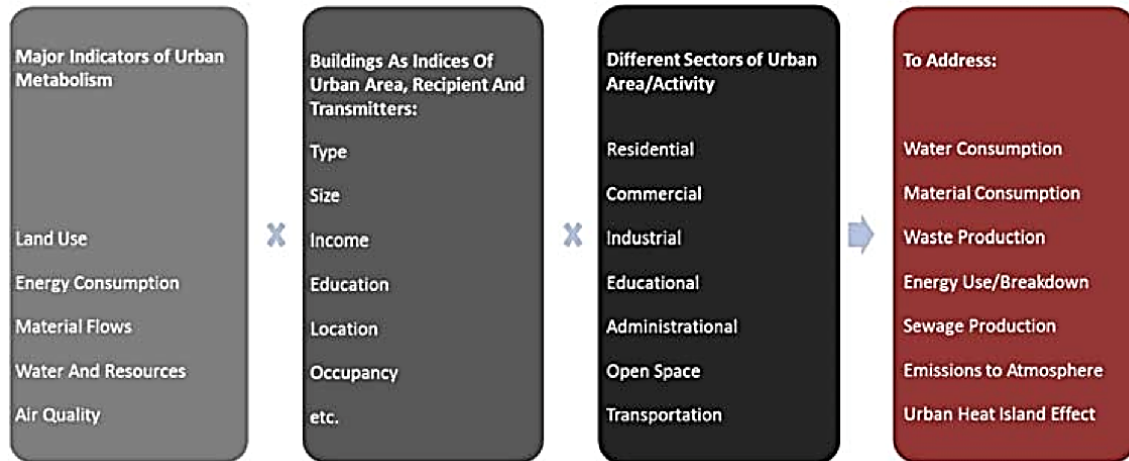


Figura 5 - Indicadores e saídas da modelagem. Fonte: Mostafavi *et al.* (2013)

### 3.1.6 Abordagem Multicamadas

Ferrão e Fernández (2013) também propõem uma estrutura multicamadas para um modelo do metabolismo dos sistemas urbanos. É apenas um modelo conceitual que busca integrar ferramentas da ecologia industrial. A abordagem consiste nas seguintes camadas:

#### 1. Balanço de massa urbano

A principal ferramenta seria a contabilidade do fluxo de massa no sistema com dados de produtos e matéria-prima. O método promove a contabilidade do fluxo de matéria-prima, produtos, resíduos e emissões e também quantifica o estoque.

#### 2. Análise de Fluxo de Materiais

A ferramenta principal seria o uso de matrizes de composição dos produtos e contabilidade do fluxo de massa. O método identifica o potencial para atividades de reciclagem e contabiliza materiais, produtos, resíduos e emissões.

#### 3. Dinâmica dos produtos

A ferramenta utilizada seria de bases de dados de vida útil dos produtos e dinâmica de sistemas. É possível ver nesta camada o fluxo de produtos, materiais acumulados como estoque e resíduos gerados pelo fim de vida dos produtos em um espaço de tempo.

#### 4. Intensidade de material dos setores econômicos

Usando tabelas de entrada e saída física e econômica, é possível associar os setores econômicos ao fluxo de matéria. Essa camada identifica também o uso de recursos a nível regional.

#### 5. Pressão ambiental do consumo de matéria

Utiliza o quadro econômico de entrada-saída e a ACV. Esta camada contabiliza os impactos ambientais incorporados nas atividades.

#### 6. Localização espacial do uso de recursos

As ferramentas utilizadas seriam SIG ( Sistemas de Informações Geográficas) e matrizes de distribuição de atividades econômicas. Com elas, torna-se possível observar a localização espacial do consumo de recursos.

#### 7. Dinâmica dos transportes

As principais ferramentas utilizadas seriam modelos baseados em agentes. Modelos de transporte orientados ao comportamento possibilitam a descrição dos meios de transporte e bens transportados no sistema urbano. A camada apresenta informações sobre mercadorias transportadas, valores, peso e modo de transporte, origem e destino.

### 3.1.7 Metodologia BRIDGE

Outra metodologia desenvolvida para o estudo foi resultado de um dos projetos criados pelo FP7 (7º Programa de Financiamento de Pesquisa e Inovação da União Europeia, para 2007 a 2013). Com o objetivo de entender os sistemas urbanos e reduzir os impactos ao meio ambiente surge o Projeto de Suporte de Decisão para Planejamento Urbano Sustentável Baseado na Avaliação do Metabolismo Urbano BRIDGE (*sustainBle uRban planning Decision support accountinG for urban mEtabolism.*).

A ferramenta permite melhorar a comunicação entre os conhecimentos biofísicos e os usuários finais, como arquitetos e engenheiros, com foco no metabolismo urbano. O BRIDGE combina medições físicas *in situ* e modelos numéricos de alta resolução para simular fluxos e indicadores que possam relacionar os processos biofísicos com fatores socioeconômicos. O sistema de suporte à decisão permite uma avaliação de alternativas possíveis fornecendo visualizações dos resultados em mapas espaciais e diagramas de aranhas (Chrysoulakis *et al.*, 2013). O fluxograma da metodologia está apresentado na Figura 6. É usado como módulo para o ESRI ArcGIS de forma a explorar os dados georreferenciados e permite que o usuário selecione a importância relativa dos indicadores.

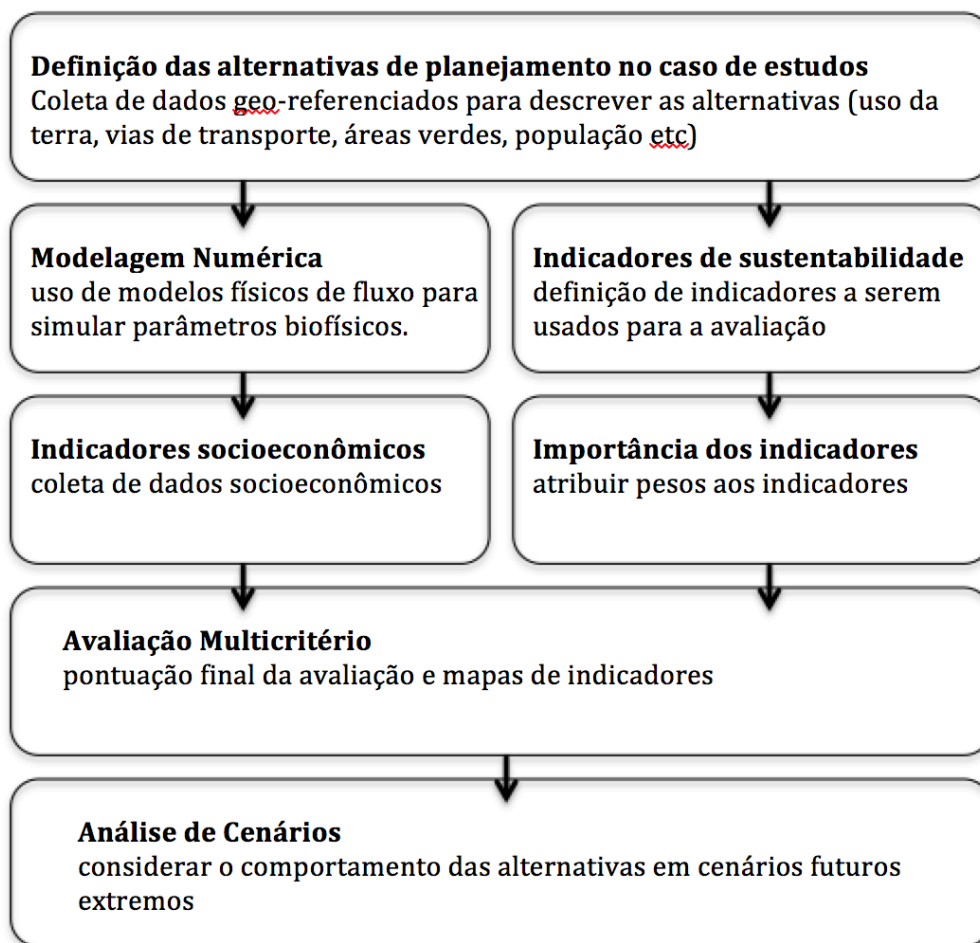


Figura 6 - Fluxograma da Metodologia BRIDGE. Fonte: traduzido de Chrysoulakis *et al.*, 2013.

### 3.2 Exemplos de Aplicações

Neste tópico serão apresentados exemplos em que o estudo do metabolismo urbano foi usado para o desenvolvimento de projetos, como o projeto de alunos da Universidade de Toronto, o caso da região de Hammarby Sjöstad, o desenvolvimento da Política de Resíduos Sólidos de Portugal (PERSU 2020) e o Diagnóstico Preliminar de Resíduos da Cidade do Rio de Janeiro.

#### 3.2.1 Projeto para Portlands, Toronto

Alunos da Engenharia Civil da Universidade de Toronto usaram o metabolismo urbano como ferramenta para o projeto sustentável do bairro de Portlands, em Toronto.

Os fluxos de água, de energia e de nutrientes foram traçados e o projeto tenta fechar os ciclos, reduzindo a entrada de recursos e a saída de resíduos. Na Figura 7 podemos ver um esboço do projeto. As soluções aplicadas envolvem o uso de água-cinza para descarga e uso externo, reciclagem de lodo do tratamento de esgoto para plantação de alimentos, recuperação da energia dos resíduos sólidos para iluminação e para um sistema de VLT (veículo leve sobre trilhos). As cinzas resultantes da gasificação dos resíduos também são aproveitadas em materiais de construção. (Kennedy *et al.*, 2010)

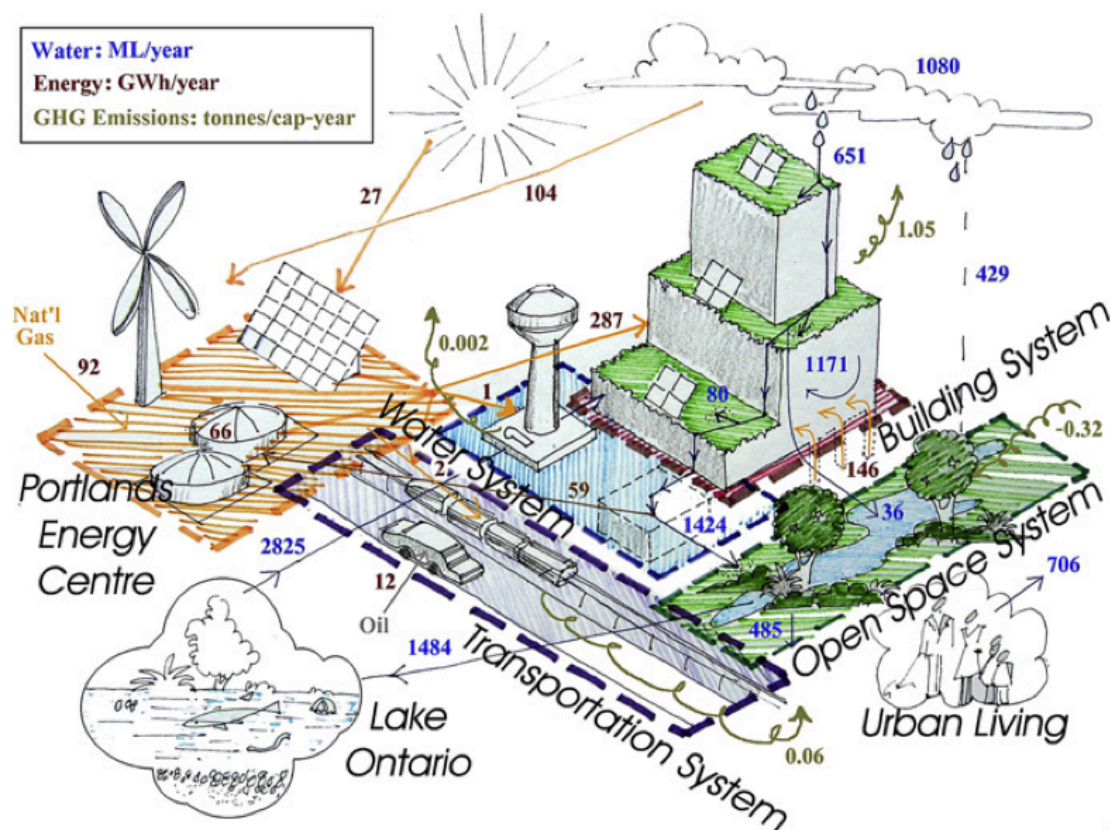
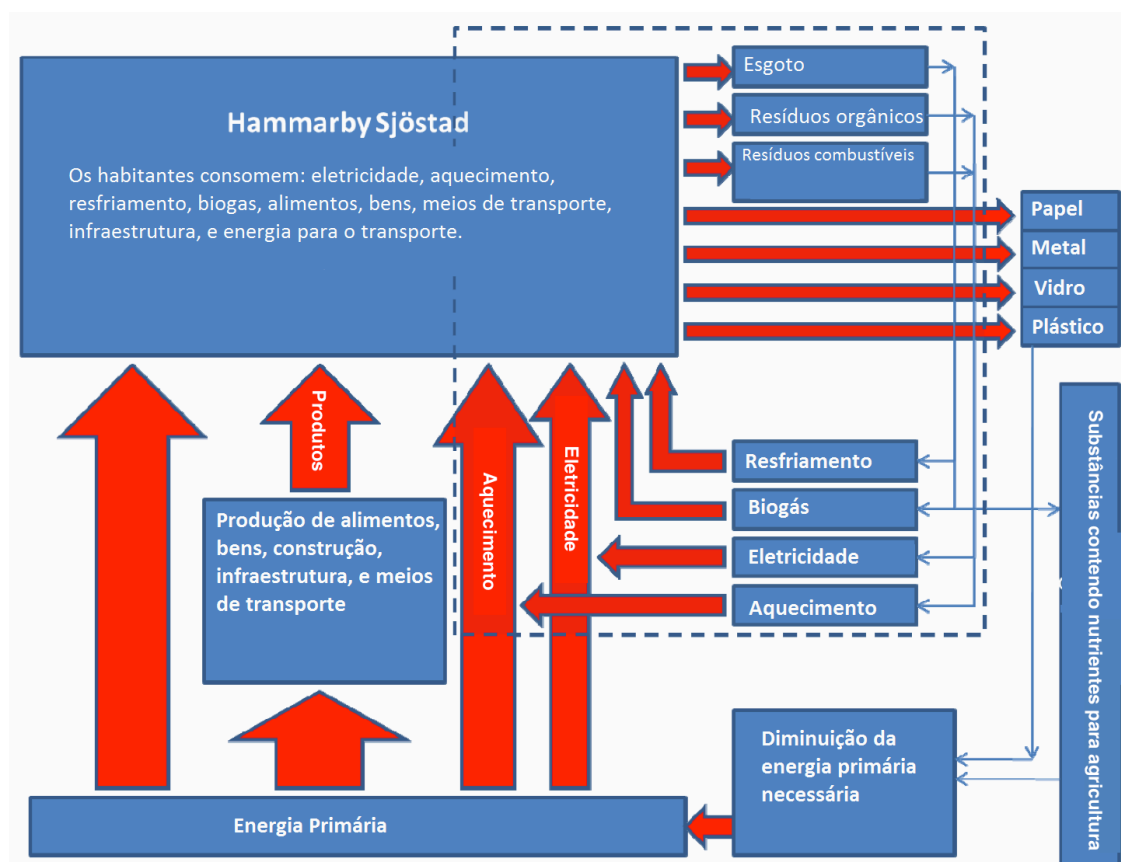


Figura 7 - Representação de um metabolismo sustentável para Portlands em Toronto (Kennedy *et al.*, 2010)

### 3.2.2 Hammarby Sjöstad

Um caso da aplicação de estratégias de simbiose urbana, discutido por Iveroth (2014), é o de Hammarby Sjöstad em Estocolmo. O projeto foi feito para revitalizar uma região industrial e portuária e estava conectado às decisões políticas voltadas aos Jogos Olímpicos de 2004. A visão do projeto era criar um distrito urbano “duas vezes melhor” do que qualquer construído em 1995. Os objetivos eram criar sinergias entre

abastecimento de energia, água e gestão de efluentes e resíduos. Os fluxos metabólicos foram reduzidos por causa de um sistema integrado de infraestrutura, o Hammarby Model, detalhado na Figura 8, resultando em estratégias de simbiose urbana. Foram usadas células de combustíveis, painéis solares, fornos de biogás e telhados verdes em pequena extensão. Apenas um quinto da energia usada pelo distrito foi gerada pelo modelo, que estava longe da sua autossuficiência. Apesar de não ter alcançado a sua meta, a experiência foi usada como aprendizado. Reconhece-se que mais energias renováveis deveriam ser integradas e menos energia deveria ser usada (Iveroth, 2014).



**Figura 8 - Modelo de Fluxo e estoque em Hammarby Sjöstad. Fonte: Traduzido de Iveroth, 2014.**

### 3.2.3 PERSU 2020

Outro exemplo de estudo aplicado é o desenvolvimento do Plano Nacional de Gestão de Resíduos desenvolvido pelo Agência Ambiental Portuguesa em parceria com o Instituto Superior Técnico. A estratégia adotada pelo Plano Estratégico para Resíduos

Urbanos (PERSU 2020), desenvolvido em 2014, é exemplo de parceria bem sucedida entre a academia e o governo para melhorar a gestão econômica e ambiental no setor dos resíduos urbanos.

Um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida indica que as emissões de Gases de Efeito Estufa serão reduzidas em 47%. O plano também permite o aumento do valor econômico do sistema de gestão de resíduos em 26%, o que vai criar, direta e indiretamente, 13.000 e 5.500 empregos, respectivamente (Ferrão *et al.*, 2016).

São adotados no plano princípios de cooperação, simbiose, fechamento de ciclos, diversidade e abordagem sistêmica. O consumo de energia e matéria é otimizado, a geração de resíduos minimizada e os efluentes de um processo são incorporados como matéria-prima de outros. O sistema foi projetado para administrar a Responsabilidade Estendida do Produtor de produtos como automóveis, pneus, eletrônicos, lubrificantes e embalagens. Eles focaram em aumentar a performance dos produtos em seus ciclos de vida em particular em seu fim de vida, disposição e processamento. Essa estratégia foi bem sucedida devido à excelente articulação entre as autoridades governamentais, a academia e o setor privado (Ferrão *et al.*, 2016).

A visão do plano incorpora o princípio da Ecologia Industrial de fechamento dos ciclos, que, conforme “PERSU 2020, (...) vai mais longe promovendo a reintrodução dos resíduos em processos produtivos, reduzindo a necessidade de extração de recursos”. A circularidade é promovida por dois principais vetores: o primeiro é limitar os investimentos em tecnologias de ponta como para aterros e plantas de incineração, apenas para segurança em casos por exemplo em que a planta adjacente esteja fechada para manutenção ou para casos em que a recuperação dos resíduos não seja econômica e tecnicamente viável. Esta política é complementada pelo aumento das taxas de aterro e incineração. O segundo vetor é melhorar os materiais recuperados dos resíduos sólidos urbanos a fim de aumentar a quantidade e o valor dos materiais usados pelas indústrias. Entre as ações propostas, foram escolhidas reforçar os sistemas de coleta para aumentar a separação na fonte, reduzindo assim a contaminação dos RSU; promover o *ecodesign* através de acordos voluntários com a indústria de embalagens; e rever os regulamentos relativos às correntes secundárias, ou geração pós-consumo, do setor dos resíduos (resíduos de combustíveis, composto, biogás). Entre as cooperações induzidas pelo plano, tem-se o uso de combustíveis gerados por resíduos em indústrias, compostagem de vinícolas, florestas e recuperação de solos (Ferrão *et al.*, 2016). A grande lição do plano, portanto, é que ele sugere que os recursos destinados à gestão de resíduos urbana



sejam usados para agregar valor a esses resíduos.

### 3.2.4 Diagnóstico Preliminar de Resíduos da Cidade do Rio de Janeiro

O Diagnóstico Preliminar de Resíduos da Cidade do Rio de Janeiro, publicado em 2015, foi um documento resultante de um projeto da Secretaria Municipal do Meio Ambiente da cidade do Rio de Janeiro realizado pela parceria com a COPPE-UFRJ. O estudo apresenta informações dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, Resíduos da Construção Civil – RCC, Resíduos de Serviços de Saúde – RSS, Resíduos de Grandes Geradores – RGG e resíduos e efluentes industriais. Além de ferramenta para uma gestão adequada dos resíduos, as informações contribuirão com a atualização do inventário de emissões de Gases de Efeito Estufa da cidade.

O documento contém dados de saída dos resíduos, às vezes, com poucas informações. As informações sobre reciclagem foram elaboradas sem resposta aos questionários de pequenos e médios depósitos de materiais recicláveis e ferros-velhos. As estimativas de geração foram feitas baseadas no PIB. Como foi observado no relatório, é necessária uma regulamentação para tornar obrigatória a disponibilização de informações dos dados de geração, transporte e disposição de resíduos e efluentes de diversas fontes. Uma contribuição do metabolismo urbano seria aprimorar os estudos incluindo dados de entrada e de variação do estoque. Pouco se estuda sobre o estoque, que, como visto nos outros capítulos, deve ser estudado para avaliar possíveis ameaças de contaminação e oportunidades de uso como substitutos de matérias primas. Uma Análise de Fluxo de Materiais poderia ser usada para atingir este objetivo, adotando uma nomenclatura adequada para a composição dos produtos e resíduos, incluindo dados de produção e importação de matérias-primas e produtos, a vida útil dos produtos nestes cálculos e também correlacionando informações geográficas e atividades econômicas ao consumo dos recursos.

Apesar da necessidade de aprimoramento, o Diagnóstico Preliminar de Resíduos Sólidos mostra que o setor da construção civil tem participação de cerca de 47% na geração de resíduos em massa e que a fração orgânica dos Resíduos Domésticos e Públicos é da ordem de 50%. Apenas com estas informações já é possível identificar oportunidades para melhorar o metabolismo urbano por meio da racionalização dos processos construtivos na construção civil, da reciclagem e da compostagem dos resíduos orgânicos.

### 3.3 Relevância do Estudo

O estudo do metabolismo urbano fornece uma estrutura baseada em uma metáfora biológica que ajuda a identificar novas soluções para repensar estratégias de desenvolvimento, além de desenvolver ferramentas, métodos e modelos multidisciplinares para estabelecer métricas que possibilitem a compreensão dos efeitos das ações humanas. Em termos de definição de políticas, as ferramentas provêm componentes para orientar a redução da poluição e diminuição do uso de recursos. É possível localizar onde ocorrem as principais perdas para o meio ambiente, fazer o balanço de massa, quantificar impactos ambientais e entender suas relações com as atividades econômicas (Ferrão e Fernández, 2013).

Os ecossistemas são dinâmicos e entender os fluxos entre seus componentes é complexo. Os fluxos determinam e são determinados pela estrutura dos sistemas. Por isso a importância da compreensão do metabolismo urbano visando à otimização do consumo de recursos nas zonas urbanas.

Grande parte dos produtos e bens consumidos no meio urbano é transformada em rejeito. Configura-se um sistema aberto, onde os nutrientes são consumidos massivamente, como comida, água, combustíveis, materiais de construção e produtos industrializados, e convertidos em resíduos, esgoto ou poluição atmosférica. A primeira lição a tomar dos princípios da ecologia industrial é transformar este metabolismo em circular, fazendo com que os resíduos sejam convertidos novamente em nutrientes. Na natureza isto é papel dos detritívoros, mas nos sistemas humanos vamos chamar de recicladores.

Devem-se buscar estratégias para instituições e cidadãos diminuam o uso de materiais perigosos e aumentarem as relações simbióticas e reciclagem para o fechamento dos ciclos dos materiais. Para isso, é necessário haver informações baseadas nas métricas adequadas e em ferramentas definidas para novas políticas que permitam esse fechamento dos ciclos por meio de uma governança orientada à sustentabilidade<sup>1</sup>. Também são necessários programas educacionais<sup>2</sup> e se ressalta a importância de movimentos da sociedade civil, para juntar sociedade e induzir parcerias público-

---

<sup>1</sup> Este seria um controle *top-down*, como o papel dos predadores nos ecossistemas naturais.

<sup>2</sup> Controle *bottom-up*, papel dos produtores primários nos sistemas naturais.

privadas<sup>3</sup> (Ferrão e Fernández, 2013). A maior parte da energia embutida nos produtos não é recuperável, mas os estoques de uma cidade podem contribuir com a economia de matéria e energia pela reciclagem futura (Timothy e Müller, 2016).

Os estudos de metabolismo urbano podem ser aplicados para indicadores de sustentabilidade, incluindo informações importantes sobre eficiência energética, ciclagem de matéria, gestão de resíduos e infraestrutura dos sistemas urbanos. Podem ser usados também como entrada para cálculo de Gases de Efeito Estufa, modelos para análises, políticas e como base para a construção urbana. Nos exemplos apresentados sobre a gestão de resíduos no capítulo anterior, vimos a importância da parceria e contribuição da academia na definição de políticas.

Kennedy *et al.* (2010) também apresentam a necessidade de entender as mudanças nos estoques da cidade. A acumulação de água em aquíferos urbanos, de materiais de construção, de calor na superfície e de nutrientes incorporados ao solo ou a resíduos precisa ser devidamente administrada. Alguns cientistas estudam determinados tipos de metais reconhecendo-os tanto como uma ameaça ambiental quanto como recursos potenciais.

A aplicação do estudo na identificação de riscos pode se dar, por exemplo, quando há acúmulo ou redução de água nos aquíferos urbanos, de calor entre os dosséis urbanos, de materiais tóxicos nas construções ou de nutrientes em lixos despejados. Com relação à água, quando a saída se dá por meio de aquíferos, seja por vazamento de tubulações ou fossas, as mudanças no lençol freático podem causar danos à infraestrutura da cidade. A gestão inadequada dos nutrientes, por sua vez, pode causar a eutrofização dos corpos d'água, contaminação de solos e também chuva ácida (Kennedy *et al.*, 2007).

Outro risco que deve ser percebido é a exaustão de recursos, incluindo de água e alimentos. Os projetistas precisam considerar o quanto os recursos mais próximos do centro urbano estão ameaçados de exaustão para adotar estratégias de desaceleração da exploração.

Portanto, os principais objetivos da abordagem do metabolismo urbano são: entender as relações entre aspectos socioeconômicos e processos biogeoquímicos, fornecer ferramentas para avaliação de diversas questões sobre os recursos urbanos, direcionar o desenvolvimento de um esquema de tipologia de cidades baseado nos

---

<sup>3</sup> Ações que funcionariam para o controle *middle-out*.

perfis de consumo de recursos e comparar o metabolismo de diferentes cidades ou sua evolução ao longo do tempo e entender as mudanças nos estoques da cidade.

### 3.4 Desafios

Os estudos de metabolismo urbano podem ser aplicados de diversas formas. Muitos deles analisam, coletam e resumem dados para apresentar para elaboração de políticas e projetos. Esses estudos não apresentam qualquer método quantitativo para projeções futuras ou fornecem métricas para avaliação de projetos. Outros focam em algum aspecto do metabolismo, como água, uso da terra e transporte, e assim sugerem métodos quantitativos de estudo. Porém, há enorme dificuldade em oferecer informações das conexões e interações múltiplas dos fluxos físicos, morfológicos e estoques que caracterizam o metabolismo urbano. Até mesmo a avaliação de cada componente individualmente não é algo trivial. Por exemplo, os espaços verdes podem ser contabilizados em termos de área ou de número de árvore plantadas, mas seus benefícios na saúde e bem-estar da população são difíceis de mensurar (Mostafavi *et al.*, 2013).

Os termos como nexo água-energia e nexo água, energia e alimentos indicam o avanço neste sentido. O conceito do nexo vem ganhando destaque pelas Nações Unidas e em documentos internacionais e integrando um novo vocabulário concernente ao desenvolvimento sustentável (Giatti *et al.*, 2016). É estudada a interrelação entre estes componentes e como impactam uns aos outros. Por exemplo, a água é necessária para a agricultura, a energia é necessária para tratar e distribuir a água e também para os processos da agricultura. A proposta desses estudos é buscar a eficiência sistêmica, em vez de refletir apenas sobre o desempenho isolado de distintos setores.

Os principais desafios encontrados pela abordagem da ecologia industrial e metabolismo urbano são: a disponibilidade de dados no nível desejado e histórico de estudos para basear as decisões; a falta de metodologias harmonizadas que permitam comparar diferentes regiões; incorporar e relacionar todos os aspectos da vida nas cidades; o efeito rebote e o conflito da escolha entre tecnologias fim de tubo (utilizadas para o tratamento, minimização ou inertização dos resíduos, emissões e efluentes) e mudanças sistêmicas.

Para o estudo detalhado do fluxo de matéria, poluentes, energia e água são necessários dados muitas vezes não disponíveis. Pela abordagem da Análise do Fluxo de Materiais, foi visto que, quanto mais detalhadas as categorias, melhores os resultados e o planejamento do reaproveitamento dos recursos disponíveis no estoque e saída dos meios urbanos. Foi visto que as estratégias verdes adotadas por algumas cidades, por serem novas, muitas vezes se baseiam em poucos estudos anteriores sobre os impactos e avaliação destas escolhas ao longo do tempo.

Devido ao fato de que cada cidade possui suas características sociais, biofísicas, culturais e econômicas, encontrar metodologias harmonizadas que permitam comparar diferentes regiões é difícil. Ademais, os dados disponíveis para cada cidade ou país podem ter sido obtidos usando métodos diferentes, com informações que seguiram diferentes critérios, o que impede a comparação.

Os elementos do metabolismo urbano são ótimos para estudos, mas sua utilização ainda é muito focada e relativamente estreita em suas preocupações e considerações. Um bom projeto deve incorporar os múltiplos aspectos da vida na cidade e suas especificidades para além da abordagem social, histórica, arquitetônica etc. Os ecossistemas, por si, já possuem uma dinâmica que independe das atividades humanas, o que torna ainda mais difícil correlacionar estas atividades. Em alguns estudos de comparação de alternativas, percebeu-se que não havia uma solução que melhorasse todos os indicadores. Os objetivos podem, muitas vezes, ser competitivos e devem ser avaliados sistematicamente para a escolha da alternativa.

Por fim, a última grande questão é sobre adotar uma abordagem que abarque tecnologias de tubo, utilizadas para o tratamento, minimização e inertização de resíduos, efluentes e emissões, ou uma abordagem de ressignificação dos sistemas. Soluções de simbiose urbana e integração de tecnologias aos sistemas de infraestrutura podem ser uma barreira para mudanças fundamentais, bloqueando ações mais radicais. As mudanças adotadas por essa perspectiva são limitadas e podem resultar em vantagens a curto prazo e desvantagens a longo prazo. Por outro lado, podem ter respostas positivas, uma vez que o uso de inovações tecnológicas e sua maior aceitação aumentam a competitividade, diminuem a dependência de subsídios e possibilitam maior difusão na sociedade.

Há um campo chamado gestão da transição que defende transformações de larga escala e transformações sociotecnológicas a longo prazo. A ideia é usar a modelagem e a previsão para encontrar estratégias criativas de desenvolvimento. Um exemplo seria,

em vez da instalação de aparelhos que economizem água em banheiros, a criação de um novo sistema de esgotamento independente do uso de água limpa. As estratégias da ecologia industrial apresentam mudanças incrementais, enquanto a gestão da transição busca mudanças radicais (Iveroth, 2014). Segundo Kennedy *et al.* (2012), alguns cientistas defendem que o potencial para uma cidade energeticamente eficiente é maior por organizações de ordem superior dos sistemas urbanos, como a reestruturação de suas funções, da economia, divisão do trabalho, formas urbanas e infraestrutura básica, que moldam as atividades.

Sobre o efeito rebote, é necessário evitar que o aumento do nível de eficiência do uso dos recursos cause respostas negativas no consumo total. Por exemplo, se uma cidade conseguir, hoje, cortar o uso de combustíveis fósseis pela metade, como garantir que esta economia não seria usada para construir mais cidades. Este efeito é chamado Paradoxo de Jevon, ou seja, o fato de o progresso tecnológico, que aumenta a eficiência com que um recurso é usado, tender a aumentar a taxa de consumo daquele recurso (Iveroth, 2014).

## 4. Construindo um metabolismo urbano sustentável

Este capítulo tem como objetivo apresentar as contribuições deste estudo e apresentar algumas indicações de caminhos para a construção de cidades sustentáveis.

### 4.1 O pensamento sistêmico na construção das cidades

Para estabelecer diretrizes em busca de um metabolismo urbano autossustentável é necessária uma abordagem sistêmica. O pensamento sistêmico pode ser abraçado pelas metáforas dadas pela natureza e pela mudança de paradigma sustentadas pela biomimética e pela ecologia industrial. No livro *A Teia da Vida*, Capra (1996) diz que é necessário ser ecologicamente alfabetizado para criar comunidades humanas sustentáveis, ou seja, entender os princípios de organização das comunidades ecológicas e usar estes princípios. Tanto as comunidades ecológicas quanto as humanas, como as cidades, são sistemas vivos, organizacionalmente fechados, mas abertos aos fluxos de energia e recursos. Utilizar o pensamento sistêmico é entender que os sistemas não funcionam linearmente e não são resultado da soma das partes, mas sim de complexas e dinâmicas inter-relações.

Em 2015, houve dois grandes processos internacionais: a adoção dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) pela Assembleia Geral das Nações Unidas (UNGA), como parte da Agenda 2030 para Desenvolvimento Sustentável, e a adoção de um novo acordo internacional, o Acordo de Paris, sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC). O desafio agora é a implementação do Acordo de Paris, sustentado por 162 Contribuições Pretendidas Determinadas em Nível Nacional (INDCs), que refletem as políticas climáticas nacionais e ações de 189 países. Ao mesmo tempo, os ODSs, que abrangem 17 objetivos e 169 metas, precisam ser traduzidos em ações nacionais e subnacionais. O artigo de Northrop *et al.* (2016) mostra que há um elevado alinhamento entre a agenda do clima e a agenda do desenvolvimento sustentável, apesar de terem sido definidas em processos separados. Através das INDCs examinadas, foram encontradas ações climáticas que foram alinhadas com 154 dos 169 ODSs (Northrop *et al.*, 2016).

Este entrelaçamento reafirma a necessidade de estudar oportunidades de medidas integradas e holísticas, com benefícios mútuos e que vão otimizar os recursos

nacionais e internacionais, que são escassos, e de apresentar uma resposta mais rápida aos desafios. Bem concebidas, as políticas e ações para o desenvolvimento sustentável produzem tanto a redução da emissão de gases de efeito estufa quanto reforçam a resiliência aos impactos do clima, enquanto as políticas climáticas e as medidas para a mitigação e adaptação podem avançar também nos objetivos de desenvolvimento.

Acelrad (2005) reafirma este diálogo dizendo que a instabilidade da sociabilidade urbana contemporânea e os cenários da crise ecológica convergem e o meio ambiente é uma temática unificadora na direção da questão urbana.

O alinhamento das agendas é mais um indício de que é preciso adotar um pensamento sistêmico e confiar nas sinergias que ele pode trazer. A metáfora biológica é a melhor fonte de inspiração e se baseia na sofisticação, eficiência e sustentabilidade da natureza.

Adotar a visão sistêmica nas decisões de projeto para cidades é algo que envolve uma análise detalhada das interrelações das diversas esferas e implicações das escolhas em cada uma delas. Para facilitar este processo e garantir que esta visão seja aplicada, pode-se tomar como base os princípios que foram apresentados nesse trabalho e que derivam da metáfora biológica.

#### 4.1 Princípios do Metabolismo Urbano Sustentável

A metáfora biológica usada pelos campos de estudo apresentados apontam para princípios que devem guiar as decisões de projetos em várias áreas. Benyus (1996) indica 10 estratégias que podem ser utilizadas nos sistemas a partir da observação de ecossistemas maduros. Capra (1996) também apresenta estes princípios, porém com diferentes observações sobre as lições que podem ser tomadas por eles. Ferrão e Fernández (2010), por sua vez, explica como estes princípios, que são base da Ecologia Industrial, podem ser especificamente aplicados para os sistemas urbanos. Na Tabela 3 foi feito um resumo destes princípios apresentados.



**Tabela 3 - Princípios para um metabolismo urbano sustentável**

<i>Estratégia dos ecossistemas</i>	
<i>maduros</i> <i>(Benyus,1996)</i>	<i>Observações</i>
<i>1. Uso de resíduos como recursos</i>	Utilizar a reciclagem, a compostagem, a logística reversa e a criação de produtos que possam ser reassimilados na cadeia produtiva.
<i>2. Diversidade e cooperação</i>	Desenvolver uma economia em que veia e artéria sejam ambas lucrativas. Viabilizar o retorno dos materiais descartados pós consumo de volta para a produção.
<i>3. Assimilação e uso eficiente de energia</i>	Buscar soluções que otimizem em vez de maximizar a produção de energia.
<i>4. Aperfeiçoamento, em vez de maior exploração</i>	
<i>5. Uso parcimonioso de materiais</i>	Criar estruturas que desempenham mais de uma função.
<i>6. Não sujar a morada.</i>	Questionar processos que poluem e também e repensar a vida útil dos produtos.
<i>7. Não esgotar recursos.</i>	
<i>8. Manter-se em equilíbrio com a biosfera.</i>	
<i>9. Operar com base em informações.</i>	Entender a importância dos sistemas de informações na ciclagem da matéria e na utilização otimizada de recursos.
<i>10. Consumo dos recursos do próprio habitat.</i>	Planejar especialistas em sua região, que a conheçam bastante e saibam seus recursos. Empenhar-se na criação de uma economia que se adapte a terra e aproveite seus atributos.
<i>Princípios dos ecossistemas</i>	
<i>(Capra,1996)</i>	<i>Observações</i>
<i>1. Interdependência</i>	Compreender a dependência mútua de todos os processos vitais dos organismos. O sucesso da comunidade depende do sucesso de cada um de seus membros e o sucesso de cada um de seus membros depende da comunidade.
<i>2. Energia solar</i>	Usar a energia solar em suas muitas formas, biomassa , vento, fotovoltaica, aquecimento solar, hidráulica. Mais economicamente eficiente e ambientalmente benigna quando os custos reais são incorporados.
<i>3. Cooperação e parceria</i>	
<i>4. Flexibilidade</i>	Ter múltiplos laços de realimentação. Um estado de tensão prolongado, quando uma ou mais variáveis forem

	empurradas até seus valores extremos, é nocivo e destrutivo. É importante encontrar os valores ideais das variáveis. Estabelecer um equilíbrio dinâmico, em vez de decisões rígidas.
5. <i>Diversidade</i>	Uma comunidade diversa será também flexível, quanto mais complexa for a rede, mais elástica será, pois será mais capaz de sobreviver e se reorganizar. As informações e ideias devem fluir por toda a rede livremente e a diversidade de interpretações e estilos de aprendizagem enriquecerá toda a comunidade.

<b>Princípios da Ecologia</b>	
<b>Industrial aplicados aos sistemas urbanos (Ferrão e Fernández, 2010)</b>	<b>Observações</b>
1. <i>Orientado aos sistemas</i>	Utilizar métricas transdisciplinares
2. <i>Metabolismo urbano</i>	Identificar o grau de circularidade, processos críticos e oportunidades do sistema
3. <i>Respeito aos limites da natureza</i>	Não exaurir recursos
4. <i>Consumo Sustentável</i>	Disponibilizar informações que permitam a conscientização sobre os impactos das decisões
5. <i>Fechamento dos ciclos de materiais</i>	As áreas urbanas podem ser vistas como minas para demanda de vários materiais
6. <i>Distribuído</i>	Provisão de bens e serviço distribuída
7. <i>Resiliente</i>	A biodiversidade aumenta a resiliência distribuindo os riscos por meio da variedade, cooperação e redundância que permitem a reorganização após a perturbação.

## 4.2 Atenção aos fluxos

A grande importância da aplicação do metabolismo urbano é identificar os processos críticos e definir estratégias para melhorar o uso dos recursos nas cidades e para diminuir a poluição gerada por elas. Uma análise do fluxo de água, resíduos, nutrientes e energia pode orientar projetos.

Os principais problemas que impedem um fluxo circular e uso eficiente da água são a poluição dos corpos hídricos e as perdas na distribuição. Com a urbanização, a água que abastece as cidades precisa vir de locais cada vez mais distantes destas, devido

à poluição, questões climáticas e aumento da demanda, que podem levar a situações de estresse ou escassez.

Alguns problemas que impedem um fluxo circular e uso eficiente de materiais são a gestão e disposição de resíduos inadequadas, o aumento desenfreado do consumo, a escolha de materiais inertes ou tóxicos no design de produtos, a pouca reciclagem e a interferência da economia nesse processo, que inviabiliza o retorno dos materiais na cadeia produtiva.

Sobre o fluxo dos nutrientes, observa-se um processo preponderantemente linear. As cidades importam alimentos das regiões agrícolas e pouco se mantém no estoque desses territórios urbanos. Os nutrientes acabam se perdendo para os corpos d'água e para o mar pelos efluentes dos esgotos ou para os aterros sanitários pelos restos de alimentos e lodo das estações de tratamento de esgoto. Como resultado, pode-se observar uma perda dos solos pela exploração, acompanhada da maior necessidade do uso de fertilizantes na agricultura, e a eutrofização dos ambientes aquáticos.

As questões de sustentabilidade enfrentadas pelo fluxo de energia nas cidades envolvem o uso de combustíveis fósseis, principalmente para o transporte, e suas consequentes emissões de gases de efeito estufa. Uma fonte renovável, mas que também enfrenta desafios, é a energia hidrelétrica, devido aos usos múltiplos das bacias hidrográficas e do cada vez mais constante conflito devido às mudanças climáticas. A eficiência na distribuição, nas construções e na iluminação pública também é outro fator chave na construção das cidades.

A nova agenda urbana, alinhada com a agenda 2030, segundo o relatório da ONU Habitat (UN-Habitat, 2016), deve promover cidades sustentáveis e assentamentos que sejam ambientalmente sustentáveis e resilientes, inclusivos, seguros, sem violência, economicamente produtivos e mais conectados, contribuindo para a transformação e sustento da zona rural.

As áreas urbanas, atualmente, encaram grandes desafios em prover serviços de maneira equitativa, cuidar dos riscos ambientais, desde poluição até os impactos das mudanças climáticas, minimizar os impactos negativos na transformação do solo, evitar a perda da biodiversidade e transformações dos ecossistemas e responder à necessidade global de descarbonização e uso racional de recursos.

O metabolismo urbano, com suas ferramentas e metodologias, pode ser usado, antes de qualquer passo, para embasamento das ações, acompanhamento e reavaliação das decisões no meio urbano. Pode ser usado também para o desenvolvimento de um

esquema de tipologia de cidades baseado nos perfis de consumo de recursos que ajude projetistas a definirem as melhores as estratégias para cada caso.

### 4.3 Passos para a introdução dos princípios de metabolismo na construção das cidades

Nos estudos apresentados, observa-se a recorrência de passos para um projeto urbano sustentável, que envolvem a definição de objetivos, um diagnóstico, uma estrutura de informações, a seleção de indicadores adequados, a compreensão das relações entre eles e um plano de ações. O estudo do metabolismo urbano apresenta algumas ferramentas da ecologia industrial aplicadas para sistemas urbanos, contribuindo com estes passos, além de poder ser usado para o acompanhamento destes indicadores como parte do processo de aprendizagem frente às escolhas feitas no projeto. Porém, primeiramente, é importante ter bem claros os princípios que devem guiar este processo e que foram resumidos no começo deste capítulo.

Sobre estratégias de projeto, as tendências de planejamento apresentadas no *World Cities Report 2016* incluem o novo urbanismo, o crescimento inteligente e o desenvolvimento urbano direcionado ao espaço público.

O novo urbanismo envolve loteamentos menores, comércio e instalações de fácil acesso, com distância compatíveis com o acesso a pé, calçadas seguras e agradáveis. O crescimento inteligente envolve ferramentas para promover o uso misto dos bairros e o uso de transportes compatíveis com os pedestres e ciclistas.

O desenvolvimento urbano direcionado ao espaço público procura reverter as tendências da urbanização informal de destinar frações inadequadas de terra para diversos serviços. As áreas públicas devem ser mais verdes e com espaços adequados para uso da população. Quando bem administradas, podem causar impacto positivo significativo na adaptação às mudanças climáticas e ilhas de calor, além de darem vida à cidade. A meta de “oferecer acesso universal a áreas seguras, inclusivas e acessíveis, verdes e públicas, particularmente para mulheres e crianças, idosos e pessoas com deficiência”, faz parte do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11, da Agenda 2030.

Todas as estratégias usadas nos projetos mencionados e no relatório enquadram-se nos objetivos de circular e reciclar, integrar e humanizar as cidades, aproximando o

homem da natureza e de sua própria natureza. Observando as tendências de estudos e de estratégias, os passos comuns para o desenvolvimento de um projeto para as cidades são:

#### 1. Realizar um diagnóstico do metabolismo da cidade

É importante ter um panorama geral da cidade e entender os fluxos de matéria, água, energia e nutrientes para perceber o estágio de urbanização, a tipologia, definir parâmetros, entender as atividades críticas e planejar o desenvolvimento que contribua com uma melhor gestão do seu estoque e a diminuição dos impactos das entradas e saídas. Este diagnóstico faz o levantamento das informações necessárias para a compreensão do metabolismo da cidade e pode ser feito qualitativa e quantitativamente. Como alternativas para o diagnóstico quantitativo, há a energia e o fluxo de massa.

São observados na literatura que os fluxos avaliados são principalmente de água, energia e materiais, mas também de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, e de substâncias específicas para determinados fins como a identificação de riscos e oportunidades de aproveitamento econômico.

Como o foco do estudo deve estar nas interrelações, é importante apresentar informações das variáveis que afetam estes fluxos para poder relacionar os ciclos biogeoquímicos com os aspectos socioeconômicos.

Para este diagnóstico, a Análise de Fluxo de Materiais é uma ferramenta bastante empregada. Com ela é possível ter uma visão do consumo e geração por categorias de materiais, por atividades assim como a disposição de resíduos por categoria e por tipo de tratamento em um determinado período. Os estudos apresentados envolveram a avaliação da dinâmica dos produtos, da intensidade de recursos usados em diversos setores, da dinâmica de transporte das cidades e dos impactos ambientais incorporados nas atividades. Foram relacionadas também informações geográficas destes fluxos.

Neste passo, observa-se a importância da academia para a elaboração dos diagnósticos que deverão ser usados para a elaboração das políticas. É necessária também uma regulamentação para tornar obrigatória a disponibilização de informações dos dados de geração, transporte e disposição de resíduos e efluentes de diversas fontes, assim como da vida útil dos produtos.

#### 2. Definir uma visão

A elaboração de uma visão para a cidade deve ser feita de forma participativa,

com mecanismos de participação da sociedade por todas as partes interessadas para fortalecer uma visão comum para a cidade. Deve conter uma visão a longo prazo e medidas de ação mais imediatas. A visão é importante para definir os objetivos dos projetos e prioridades das decisões.

### 3. Elaborar uma estrutura de avaliação

Esta estrutura estabelecida deve facilitar o entendimento das complexas interações em um sistema. Ela pode ser feita através do uso de indicadores, correlações e avaliações de performance ao longo do tempo. Neste trabalho foram detalhadas a estrutura DPSIR, a avaliação multicamadas, a metodologia BRIDGE e a análise integrada do metabolismo urbano (IUMAT).

As análises consistem em definir alternativas, utilizar modelagens físicas, definir os indicadores ambientais e socioeconômicos, definir a importância que será dada a cada um e realizar uma avaliação multicritério de acordo com os objetivos do projeto. É importante também desenvolver cenários, baseados nesta análise, que incorporem as várias esferas da vida nas cidades, suas tendências demográficas, sociais, econômicas e ambientais. A definição da estrutura, das ferramentas e dos indicadores a serem considerados deve ser registrada e contribuir com os estudos de metabolismo urbano. Na Tabela 4 são apresentadas as informações e indicadores usados nestas estruturas de avaliação.

**Tabela 4 - Indicadores e informações necessárias para o estudo do Metabolismo Urbano**

<i>IUMAT (Mostafavi et al. 2013)</i>	<i>Exemplos para a DPSIR (Ferrão e Fernández, 2010)</i>	
<p><b>Indicadores principais</b> Uso da Terra, Consumo de energia, fluxo de materiais, água, qualidade do ar</p> <p><b>Construções</b> Tipo, tamanho, renda, educação, localização, ocupação</p> <p><b>Setores de Atividades</b> Residencial, comercial, industrial, educacional, administrativa, espaço aberto, transporte</p>	<b>Forças Motoras</b>	População e território: número de habitantes
		Energia: eletricidade e consumo de gás per capita
<p><b>Metodologia BRIDGE</b></p> <p><b>Ambientais</b> Qualidade do ar, balanço hídrico, energia, conforto térmico, espaços verdes e materiais</p> <p><b>Sociais</b> Uso da terra, mobilidade, inclusão social, bem estar</p> <p><b>Econômicos</b></p>	<b>Pressões</b>	Transporte: frota
		Educação: taxa de natalidade
<p><b>MFA de Lisboa (Niza et al. 2009)</b></p> <p>Comércio Internacional Transporte Nacional, Transporte Nacional, Números de estabelecimentos por atividade econômica e números de empregados Poder de compra, Pesquisa Anual da Produção Industrial Vendas de Combustíveis Produção de resíduos de embalagens Pesca Resíduos Industriais, Resíduos Sólidos Urbanos</p>	<b>Estado</b>	Aquecimento Global: Emissões de CO2
		Transporte: Veículos por hora em determinada localização Educação: número de estudantes matriculados no ensino fundamental Gestão de resíduos: produção per capita
	<b>Impactos</b>	Aquecimento Global: concentração de GEE em ppm Qualidade do ar: concentração de SO2 e NO2 em ppm Educação: porcentagem de estudantes no ensino médio Gestão de resíduos: porcentagem de resíduos reciclados
		População e território: desemprego Energia: Aquecimento Global (kg CO2 equivalente)
	<b>Respostas</b>	Transporte: horas gastas em engarrafamento
		Aquecimento Global: eficiência energética nas construções Transporte: investimento em transporte público Educação: número de escolas por habitante

#### 4. Monitorar, avaliar e comunicar

O monitoramento e o acompanhamento dos indicadores são muito importantes para a avaliação do sucesso das medidas. Deve-se investir nisto, na documentação para futuros estudos e na comunicação para a mobilização das pessoas. As novas tendências

de planejamento verde para as cidades ainda são feitas com pouco embasamento dos estudos de metabolismo. É importante o monitoramento para evitar o efeito rebote, e para responder questões sobre os conflitos entre mudanças fundamentais e a adoção de medidas de simbiose assim como seus efeitos a curto e longo prazos.

#### 5. Disponibilizar informação e realizar programas de educação ambiental

O envolvimento da população é parte fundamental da transição para cidades mais sustentáveis. A população deve ter acesso a informações para que possa entender os impactos de suas decisões e saber as alternativas possíveis. Medidas que visem a aproximar o homem da natureza tornam o processo de mudanças de hábitos mais orgânico. Um ótimo exemplo é o guia da cidade de Cape Town (City of Cape Town, 2011). O guia apresenta um passo a passo com informações sobre a cidade, conceitos sobre sustentabilidade e apresentação de alternativas práticas sobre como a população pode adotar medidas simples para uma vida mais sustentável e ainda economizar com isso. Estas informações vão desde instruções sobre a separação dos resíduos até receitas de materiais de limpeza caseiros e ecológicos, identificação de vazamentos, informações sobre instalações elétricas e um manual de composteira doméstica. Outro exemplo é o Yangzhou's Eco Centre na China, em que os cidadãos podem compartilhar e discutir ideias relacionadas ao meio ambiente.



## **5. Considerações finais**

### 5.1 Conclusões

Os campos de estudo tratados neste trabalho indicam a importância e o poder de utilizar metáforas baseadas na ecologia, na biologia, no estudo e na observação da natureza. A metáfora da natureza, particularmente aquela entendida pelos ecossistemas, pode direcionar a conexão com os recursos naturais e definir limites de crescimento baseados na ideia de suficiência.

A ecologia industrial apresenta estratégias de uso destes recursos de forma eficiente, circular e com o mínimo de impacto sobre o meio ambiente. O estudo do metabolismo urbano apresenta uma série de ferramentas que podem ser usadas para a compreensão dos fluxos de matéria, água, energia e nutrientes. Ele pode ser realizado em diferentes perspectivas e há diversas metodologias e estruturas de avaliações.

Foram identificados os principais desafios para as cidades nas próximas décadas e para a utilização das ferramentas do metabolismo urbano disponíveis, sendo a compreensão da interrelação entre os diferentes indicadores a maior delas.

Para um projeto urbano que conduza a soluções sustentáveis, deve-se, antes de tudo, usar a visão holística para alcançar soluções integradas. Quanto mais perspectivas forem incorporadas no processo, quanto mais interdisciplinar for o estudo, melhores serão as soluções. O estudo do metabolismo urbano reforça a importância do diálogo entre biólogos, engenheiros e arquitetos.

O presente estudo identificou a importância de um bom diagnóstico, monitoramento e acompanhamento da cidade, com foco nos fluxos e nas relações de interdependência para a elaboração de projetos. A sugestão é que os princípios sejam definidos por analogias aos sistemas ecológicos para que então se defina uma estrutura de informações e os indicadores a serem avaliados, com base no metabolismo urbano. Os indicadores e importâncias devem ser definidos avaliando sistematicamente o contexto e especificidades das cidades e devem ser baseados no objetivo do projeto de acordo com a visão para elas. Estes passos conduzirão a um sistema urbano eficiente, diversificado, conectado, inclusivo e que vise à autossuficiência.

Esse processo, para ter efeitos positivos efetivos, deve ser acompanhado da disponibilização a todos os cidadãos das metodologias, dos dados e das informações

que permitam a qualquer um entender e avaliar os mecanismos propostos. É importante salientar que todo o processo deve ocorrer de dentro da cidade ou município para fora, para as ações. Academia e pesquisadores têm papel fundamental na disponibilização de conhecimento e no papel de consultores dos cidadãos para que estes possam assumir a responsabilidade pelas decisões.

Sobretudo, deve-se passar a adotar um pensamento sistêmico em todas as áreas de conhecimento e confiar nas sinergias que ele pode trazer. Um conhecimento desenvolvido a partir do entendimento das relações, incorporando o padrão de rede e natureza cíclica da vida pode superar os desafios da escolha entre adotar estratégias a curto prazo ou construir novos sistemas que comportem esta visão desde o princípio.

A natureza está cheia de sistemas ecológicos e estratégias que podem nos inspirar na criação de sistemas autossustentáveis. Em um contexto em que a economia enfatiza a competição, expansão e a dominação, devemos buscar soluções de cooperação, conservação e a parceria. A metáfora biológica é a melhor fonte de inspiração e ela pode nos salvar, pois estamos todos interligados nesta teia da vida.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho apresentou os princípios para o metabolismo urbano sustentável e correlacionou algumas abordagens que visam a alcançá-lo. A seguir são apresentadas sugestões para dar continuidade ao tema.

Podem ser realizados estudos de caso que contenham um levantamento dos indicadores para uma avaliação preliminar e qualitativa de alguma região.

Outra sugestão é escolher ou combinar os métodos e ferramentas para encontrar uma análise quantitativa que seja interessante para avaliar cidades brasileiras ou enquadrá-las em tipologias de perfis de consumo de recursos.

Os trabalhos futuros podem também realizar, por meio das metodologias aqui apresentadas, como a metodologia BRIDGE, escolhas entre alternativas de projetos de intervenções no meio urbano.

Por fim, um outro possível estudo seria realizar uma Análise de Fluxo de Materiais para complementar o Diagnóstico Preliminar de Resíduos da cidade do Rio de Janeiro, fortalecendo-o e utilizando-o para melhor compreensão do metabolismo com relação aos resíduos gerados, processos críticos e oportunidades de melhorar sua gestão.

## Referências Bibliográficas

- ABIO, Feiras orgânicas da ABIO - abiorj. Disponível em: <<http://abiorj.org/feiras-organicas-da-abio/>>. Acesso em: 1 fev. 2017.
- ABNT. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida. Rio de Janeiro, 2009.
- ACSELRAD, H., 2005 “Desregulamentação, Contradições Espaciais e Sustentabilidade Urbana” **Revista Paranaense De Desenvolvimento, Curitiba**, n.107, p.25-38, jul./dez. 2004
- ANDRADE, L. M. S., BLUMENSCHHEIN, R. N., 2014. “A nova Ecologia da Cidade: uma conexão importante para a ciência do Desenho Urbano” **APPUrbana2014**. UFPA, Belém.
- BENYUS, J. M., 1997. **Biomimética: Inovação Inspirada pela Natureza**. Tradução de Milton Chaves de Almeida. 2 ed. São Paulo, Editora Cultrix, 2005.
- CAPRA, F., 1996. **A Teia da Vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. Tradução de Newton Roberval Eichenberg. 1 ed. São Paulo Editora Cultrix, 2006.
- CARVALHO, C. C., COSTA, L. N. L. A., 2015. *O papel da resiliência urbana e do metabolismo urbano na questão da redução de risco de desastre*, Projeto de Graduação para o Título de Engenheira Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- CHRYSOULAKIS, N. BRIDGE Project Progress. Bruxelas: [s.n.]. Disponível em : <[fp7.eu/images/reports/BRIDGE\\_Demo\\_Event\\_26Oct2011\\_Final\\_Nektarios\\_Chrysoulakis.pdf](http://fp7.eu/images/reports/BRIDGE_Demo_Event_26Oct2011_Final_Nektarios_Chrysoulakis.pdf)>. Acesso em: 2 jan. 2017.
- CHRYSOULAKIS, N. LOPES, M. , SAN JOSÉ, R. *et al.* , 2013 , “Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project”, **Landscape and Urban Planning**, v.112, pp. 100-117.
- City of Cape Town, 2011. *Smart Living Handbook*. Cape Town. South Africa.
- FERRÃO, P., FERNÁNDEZ, J. E., 2013, **Sustainable Urban Metabolism**. Cambridge, The MIT Press.
- FERRÃO, P., LORENA, A., RIBEIRO, P., 2016 “Industrial Ecology and Portugal’s National Waste Plans”. In: Clift, R., Druckman, A.(eds), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Guildford, UK, Springer Open.
- FRANCO, N. M., 2012, “A Cidade do Rio de Janeiro no contexto das mudanças climáticas e na transição para a economia verde”. In: Cadernos Adenauer XIII, *Caminhos para a sustentabilidade*. Rio de Janeiro, Fundação Konrad Adenauer.
- GIATTI *et al.*, 2016. “O nexos água, energia e alimentos no contexto da Metrópole

Paulista. ” **Estud. av.** vol.30 no.88 São Paulo.

GRAEDEL, T. E., LIFSET, R.J., 2016 “Industrial Ecology’s First Decade ”. In: Clift, R., Druckman, A.(eds), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Guildford, UK, Springer Open.

GUERREIRO, M. R. P., 2010. *Urbanismo Orgânico e a Ordem Implícita: Uma Leitura Através das Geometrias da Natureza*, Tese de D.Sc, Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, Portugal.

IBGE, 2010. *Características da população*. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-povo/caracteristicas-da-populacao.html>>. Acesso em: 2 jan. 2017.

ICLEI, 2009. *Sustainability Planning Toolkit*. Local Governments for Sustainability. USA.

IVEROTH, S. P., 2014, *Industrial Ecology for Sustainable Urban Development- the case of Hammarby Sjöstad*. Department of Sustainable development, environmental science and engineering School of Architecture and Built Environment, Stockholm, Sweden.

KENNEDY, C. A., 2016 “Industrial Ecology and Cities”. In: Clift, R., Druckman, A.(eds), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Guildford, UK, Springer Open.

KENNEDY, C., BAKER, L., DHAKAL, S., RAMASWAMI, A., 2012, “Sustainable Urban Systems: An Integrated Approach”, *Journal of Industrial Ecology*, v.16, n. 6, pp. 775-779.

KENNEDY, C., CUDDIHY, J., ENGEL-YAN, J., 2007, “The Changing Metabolism of Cities”, *Journal of Industrial Ecology*, v.11, n.2, pp. 43-59.

KENNEDY, C., PINCETL, S., BUNJE, P., 2010, “The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design”, *Environmental Pollution*, doi:10.1016/j.envpol.2010.10.022 .

LEED, 2016. *LEED v4 for Neighborhood Development*. U. S. Green Building Council.

Marzluff, J.M.; Shulenberger, E.; Endlicher, W.; Alberti, M.; Bradley, G.; Ryan, C.; ZumBrunnen, C.; Simon, U. (Eds.) 2008. *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*. Nova Iorque, Springer.

MOSTAFAV, N., *et al.*, 2013. “Integrated Urban Metabolism Analysis Tool (IUMAT)”, *Urban Policy and Research*, DOI: 10.1080/08111146.2013.826578  
NORTHROP, E. *et al.*, 2016. Examining The Alignment Between The Intended Nationally Determined Contributions And Sustainable Development Goals. *WRI*. Disponível em : < [https://www.wri.org/sites/default/files/WRI\\_INDCs\\_v5.pdf](https://www.wri.org/sites/default/files/WRI_INDCs_v5.pdf) > Acesso em 30 jan. 2017, 09:03:00.

PATTEN, B. C., 1978. “Systems Approach to the Concept of Environment”.*The Ohio*

*Journal of Science*, v.78, n. 4, pp. 206-222 .

RIO PREFEITURA, 2015. *O RIO DO AMANHÃ Visão Rio 500 e Planejamento Estratégico 2017 - 2020*. Rio de Janeiro: Visão Rio 500. Disponível em : <<http://www.visaorio500.rio/pdf/book-planejamento-estrategico.pdf>> Acesso em 30 jan. 2017, 09:03:00.

RIO RESILIENTE, 2015. *Rio Resiliente, Estratégia de Resiliência da Cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.

RIO RESILIENTE, 2015. *Rio Resiliente, Diagnóstico e Áreas de Foco*. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/126674/4134832/Resiliencia.pdf> > Acesso em 30 jan. 2017, 09:03:00.

RODRIGUEZ, A. F. M., 2012. *Caracterização do consumo doméstico de materiais da cidade de Montevideu mediante Análise de Fluxos de Materiais*, Tese de D.Sc, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

ROSALES, N., 2011, “Towards the modelling of sustainability into urban planning: Using indicators to build sustainable cities”, *Procedia Engineering* , v.21, pp. 641-647.

SMAC, 2015, *Diagnóstico Preliminar de Resíduos Sólidos da Cidade do Rio de Janeiro*. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Rio de Janeiro. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. 49pp.

SMAC, 2015, *Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa da Cidade do Rio de Janeiro 2012*. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. Rio de Janeiro. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. 62pp.

SMAC, Mudanças Climáticas. Disponível em: <<http://prefeitura.rio/web/smac/mudancas-climaticas2>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

SMAC, Resíduos Sólidos - prefeitura.rio. Disponível em: <<http://prefeitura.rio/web/smac/residuos-solidos>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

SMAC, 2011. Notícias - prefeitura.rio. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/exibeconteudo?article-id=2367969>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

SIRACUSA, G., LA ROSA, A.D., LA MOLA, P. P. E., 2007 “New frontiers for sustainability: emergy evaluation of an eco-village”. *Environ Dev Sustain*. Springer Science.

The Cities Alliance, 2007. *Liveable Cities- The Benefits of Urban Environmental Planning. A Cities Alliance Study on Good Practices and Useful Tools*. Washington, DC.

TIMOTHY, M. B., MÜLLER, D. B., 2016 “A social-economic Metabolism approach to Sustainable Development and Climate Change Mitigation”. In: Clift, R., Druckman, A.(eds), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Guildford, UK, Springer Open.

UN-Habitat, 2016. *Urbanization and Development: Emerging Futures: World Cities Report 2016.*, Nairobi.

UNRIC, 2014, Relatório da ONU mostra população mundial cada vez mais urbanizada, mais de metade vive em zonas urbanizadas ao que se podem juntar 2,5 mil milhões em 2050. Disponível em : < <http://www.unric.org/pt/actualidade/31537-relatorio-da-onu-mostra-populacao-mundial-cada-vez-mais-urbanizada-mais-de-metade-vive-em-zonas-urbanizadas-ao-que-se-podem-juntar-25-mil-milhoes-em-2050> > Acesso em 12 jan. 2017, 09:03:00.

WIEDMANN, T. 2016 “Impacts Embodied in Global Trade Flows”. In: Clift, R., Druckman, A.(eds), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Guildford, UK, Springer Open.

WWF, Pegada Ecológica. Disponível em: <[http://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/especiais/pegada\\_ecologica/](http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/especiais/pegada_ecologica/)>. Acesso em: 2 jan. 2017.