



SIGRADI2018
TECHNOPOLITICAS
xxii congresso da sociedade
iberoamericana de gráfica digital
22th conference of the
iberoamerican society
of digital graphics
07|08|09|novembro|2018
iau usp | são carlos | sp br

Potential use of Internet of Things to support Life Cycle Assessment of buildings

Natália Nakamura Barros

Universidade Estadual de Campinas | Brazil | natalianakamura.arq@gmail.com

Regina Coeli Ruschel

Universidade Estadual de Campinas | Brazil | ruschel@g.unicamp.br

Abstract

This article summarizes the initial discoveries of doctoral research, whose principal aim is to analyze the use of Internet of Things to support Life Cycle Assessment of buildings. The first cycle of this thesis consists of a preliminary investigation on electronics newspapers that deal with the integration of LCA and IoT. The results reveal that IoT technology could provide real-time data collection, possibility of Big Data collection and monitoring, and greater precision and reliability of data. IoT-Based LCA is very promissory and innovative. In this way, this research intends to bring a relevant contribution to architecture, engineering and construction (AEC).

Keywords: Life cycle assessment; Internet of Things; LCA; IoT.

INTRODUÇÃO

A necessidade de redução dos impactos ambientais é crescente em todo o mundo. As atividades da construção civil principalmente geram um alto impacto ambiental. A Avaliação do Ciclo de Vida - ACV constitui a metodologia preferida internacionalmente para investigar sistematicamente os impactos de um produto, processo ou sistema em cada etapa de seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até o fim-de-vida (Guinée, 2002).

A ACV é dividida em quatro fases, sendo estas: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (ABNT, 2009b). A etapa de análise de inventário, na qual ocorre a coleta de dados, pode ser trabalhosa e demorada (Rist, 2011), uma vez que há uma grande quantidade de dados requeridos para a avaliação (Mashhadi & Behdad, 2017). Além disso, à medida que os dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos ou limitações podem ser identificados, requerendo mudança nos procedimentos (ABNT, 2009b).

Atualmente, a forma tradicional de coleta de dados ainda é manual, e o processo de avaliação busca dados em bases existentes (Tao, Zuo, Xu, Lv, & Zhang, 2014), o que diminui a confiabilidade e precisão dos mesmos. Deste modo, os principais problemas da ACV relacionam-se principalmente à disponibilidade e à qualidade dos dados (Reap, Roman, Duncan, & Bras, 2008).

A quantidade de informações e a complexidade que envolve a ACV de edificações fazem com que métodos computacionais e inovadores sejam necessários (Schlueter & Thesseling, 2009). Dentre as tecnologias mais inovadoras, está a Internet das Coisas - IoT, na qual a Internet é usada como uma plataforma global para

máquinas e objetos inteligentes comunicarem, dialogarem, compilarem e dialogarem (Miorandi, Sicari, De Pellegrini, & Chlamtac, 2012). A IoT cria um tecido de rede inteligente e invisível que pode ser detectado, controlado e programado (Chase, 2013), no qual entidades físicas e digitais podem ser vinculadas, para permitir uma nova classe de aplicativos e serviços (Miorandi et al., 2012).

As práticas da IoT estão se espalhando para diversos domínios de ciência e tecnologia, entretanto atualmente não se tem conhecimento de como aplicá-la à ACV de edificações. Deste modo, questiona-se: a IoT consegue apoiar a totalidade dos dados necessários à ACV de edificações?

O presente artigo tem como meta revelar as descobertas iniciais de uma pesquisa de doutorado, cujo objetivo principal é verificar o uso de Internet das Coisas para apoiar a Avaliação do Ciclo de Vida de edificações. Para tal, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em periódicos relevantes da área a fim de explicitar os estudos que tratam da integração entre ACV e IoT.

FUNDAMENTAÇÃO

Esta seção fundamentará a Avaliação do Ciclo de Vida e Internet das Coisas.

AValiação do ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida é uma técnica para contabilização de impactos de produtos e processos desde a extração de matéria-prima, passando por produção, uso e disposição final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b). O amadurecimento de pesquisas e aplicações da ACV nos últimos 10 anos, principalmente, torna-a um apoio

fundamental na estimativa de impactos e cálculo de indicadores ambientais

A *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* - SETAC foi o primeiro organismo internacional a trabalhar no desenvolvimento da ACV, e foi posteriormente normalizada pela *International Standardization Organization* – ISO (Guinée, 2002). No Brasil, a ACV foi normatizada pela NBR ISO 14040: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações, que divide a ACV em quatro fases, sendo estas: objetivo e definição do escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação (ABNT, 2009b).

Uma das etapas mais importantes da ACV é a análise de inventário do ciclo de vida, que envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema (ABNT, 2009b). A tarefa mais exigente na realização de uma ACV é a coleta de dados. Embora uma grande quantidade de dados esteja disponível na literatura, alguns processos e materiais ainda não estão disponíveis (Goedkoop, Oele, Leijting, Ponsioen, & Meijer, 2016). Deste modo, a coleta de dados pode ser um processo de intensiva demanda de recursos (ABNT, 2009b).

Os principais desafios da aplicabilidade da ACV no contexto brasileiro são principalmente devido à ausência de base de dados nacional de materiais de construção. Uma alternativa à esta ausência é o uso de um banco de dados internacional, porém devido às enormes diferenças em termos de tecnologias, geologia, clima, densidade de população, biomas, tipos de produtos, entre outros; a aplicação destas bases em países que não possuem um banco de dados torna-se um desafio (Bauman & Tillman, 2004). Desse modo, o levantamento de informações acerca dos materiais de construção pode ser complexo, demorado e oneroso.

Outro grande desafio, é a falta de uma descrição detalhada do procedimento da ACV nas normas ISO, o que torna difícil avaliar se foi feita de acordo com o padrão. Deste modo, é necessária a documentação cuidadosa da meta, questões de escopo e interpretação da ACV, para comprovar sua adequação às normas ISO. Outra possibilidade é a inclusão de uma revisão de pares por peritos independentes (Goedkoop et al., 2016).

As principais aplicações da ACV são: verificação de oportunidades de melhorias a partir da identificação dos principais impactos ambientais no ciclo de vida de um produto; análise da contribuição das fases do ciclo de vida do produto para a carga ambiental global; comparação entre produtos para comunicação interna ou externa; base para as declarações de produtos ambientais e métricas padronizadas; e identificação de indicadores de desempenho de produtos (Goedkoop et al., 2016).

INTERNET DAS COISAS

A *IoT* refere-se a um ambiente de computação hiperconectado, independentemente da natureza das coisas conectadas. Em outras palavras, é uma réplica virtual do mundo físico. As fronteiras entre os mundos

virtual, físico e biológico tornam-se, assim, quase inexistentes, criando-se novos sistemas cyber-físicos. Não apenas os seres humanos e outros organismos vivos, mas virtualmente qualquer objeto, animado ou inanimado, podem ser conectados à *IoT* e conversar uns com os outros através de sensores e conectividade sem fio, rastreados em tempo real (Ozdemir & Hekim, 2018).

A definição de *Internet of Things* ainda é imprecisa e pode ter diferentes facetas dependendo da perspectiva adotada, como, por exemplo, ela pode ser: orientada para as coisas, orientada para a Internet e orientada à semântica (Atzori, Iera, & Morabito, 2010). Na primeira perspectiva, é razoável definir a *IoT* como: coisas que têm identidades e personalidades virtuais operando em espaços inteligentes usando interfaces inteligentes para se conectar e se comunicar dentro de contextos sociais, ambientais e de usuários. Na segunda perspectiva, orientada para a Internet, coloca-se o foco na integração contínua, e pode ser formulada como: objetos interconectados tendo um papel ativo no que pode ser chamado de Internet do Futuro. Já na perspectiva semântica, *IoT* significa uma rede mundial de objetos interconectados exclusivamente endereçáveis, baseada em protocolos de comunicação padrão (European Commission, 2008).

A evolução da Internet começa com a conexão de dois computadores e depois com a criação da *World Wide Web*, em 1991, conectando um grande número de computadores. A Internet móvel surgiu conectando dispositivos móveis à Internet. Com o crescente uso das redes sociais, as identidades das pessoas se juntaram à Internet, e finalmente, há um movimento contínuo em direção à Internet das Coisas, conectando todos os objetos do dia-a-dia à Internet (Perera, Zaslavsky, Christen, & Georgakopoulos, 2014).

A frase *Internet of Things* foi cunhada há 10 anos pelos fundadores do *MIT Auto-ID Center*, com menção especial a Kevin Ashton, em 1999, e David L. Brock, em 2001. O termo *Auto-ID* refere-se a qualquer classe ampla de tecnologias de identificação usadas na indústria para automatizar, reduzir erros e aumentar a eficiência. Essas tecnologias incluem códigos de barras, cartões inteligentes, sensores, reconhecimento de voz e biometria. Mas desde 2003, a principal tecnologia *Auto-ID* tem sido a identificação por radiofrequência - *RFID* (European Commission, 2010).

Os sistemas *RFID* podem ser usados para monitorar objetos em tempo real, isso permite mapear o mundo real no mundo virtual. Do ponto de vista físico, uma *tag RFID* é um pequeno microchip conectado a uma antena (Atzori et al., 2010). Quando conectados às redes de sensores, os sistemas *RFID* permitem um melhor acompanhamento do *status* das coisas, ou seja, sua localização, temperatura, movimentos, etc (Atzori et al., 2010).

Existem três categorias de redes de sensores que compõem a *IoT*: redes de sensores corporais, redes de sensores de objetos e redes de sensores de ambiente (Perera et al., 2014). A maioria das redes de sensores implantadas, hoje, é sem fio, baseadas em diversas tecnologias, como: rede de área pessoal sem fio, por exemplo, Bluetooth; rede local sem fio, por exemplo, Wi-

Fi; rede sem fio de área metropolitana; rede de longa distância sem fio, por exemplo, redes 2G e 3G; e rede de satélites (Perera et al., 2014).

A arquitetura *IoT* pode ser composta por 4 principais etapas (Bradich, 2017):

- i) Etapa 1: Coisas são conectadas a sensores para captura de dados e atuadores através de conexão com ou sem fio;
- ii) Etapa 2: Sensores e atuadores se conectam a gateways, comutadores e sistemas de aquisição de dados;
- iii) Etapa 3: Sistemas de TI calculam estes dados, fornecem acesso à aplicativos e revelam insights sobre as coisas conectadas, os dispositivos e o ambiente ao redor;
- iv) Etapa 4: Centro de dados remoto ou a nuvem.

Estas etapas são realizadas em um *middleware*, que consiste em uma camada de software ou um conjunto de subcamadas interpostas entre os níveis tecnológico e de aplicação. O *middleware* deve incluir funções relacionadas ao gerenciamento, privacidade e segurança de todos os dados trocados (Atzori et al., 2010). As arquiteturas de *middleware* propostas nos últimos anos para a *IoT* geralmente seguem a abordagem *Service Oriented Architecture* – SOA, composta pelas seguintes camadas:

- i) Abstração de objetos: camada capaz de harmonizar o acesso aos diferentes dispositivos com uma linguagem e um procedimento comuns;
- ii) Gerenciamento de serviços: fornece as principais funções que devem estar disponíveis para cada objeto e permite o gerenciamento no cenário de *IoT*;
- iii) Composição do serviço: criação de processos complexos com uma sequência de ações coordenadas;
- iv) Aplicações: exportação de todas as funcionalidades do sistema para o usuário final (Atzori et al., 2010).

O uso de redes de sensores tem sido proposto em diversos cenários de aplicação, como monitoramento ambiental, *e-health*, sistemas de transporte inteligentes, militares e monitoramento de plantas industriais (Atzori et al., 2010). Além destas, *IoT* pode ser utilizada na área de varejo, logística, alimentos, saúde, ambientes inteligentes, eficiência de recursos, poluição e prevenção de desastres (European Commission, 2008).

Os principais desafios da *IoT* relacionam-se à ausência de governança, privacidade e segurança (European Commission, 2008). A automação extrema representa vulnerabilidades que foram pouco consideradas até agora. Primeiro, os sistemas altamente integrados são vulneráveis a riscos sistêmicos, como o colapso total da rede no caso de falha de uma de suas partes, por exemplo, por vírus de hackers, que podem invadir totalmente os sistemas integrados. Em segundo lugar,

conectividade extrema pode criar novas estruturas de poder social e político (Ozdemir & Hekim, 2018).

METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta primeira etapa da tese, consistiu em pesquisa bibliográfica (Marconi & Lakatos, 2010), realizada em periódicos eletrônicos a fim de evidenciar os artigos que tratam da integração entre ACV e *IoT*. A pesquisa foi realizada em junho de 2018 e buscou a combinação entre as palavras-chave: *LCA AND IoT*; *Life Cycle Assessment AND Internet of Things*, nas bases de dados eletrônicas relevantes para AEC: Scopus, ASCE, *Web of Science* e *Enginnering Village*. A tabela 1 mostra o protocolo desta pesquisa bibliográfica.

Tabela 1: Protocolo de Pesquisa Bibliográfica: ACV + *IoT*.

Data da Pesquisa	19/06/2018
Termos de busca	LCA + <i>IoT</i> ; "Life Cycle Assessment" AND "Internet of Things"
Fonte	SCOPUS - https://www.scopus.com/ ; COMPENDEX - www.engineeringvillage.com/ ; ASCE LIBRARY - ascelibrary.org/ ; WEB OF SCIENCE - webofknowledge.com/ .
Idioma	Inglês
Crítérios de Pesquisa	Scopus: Título, Resumo e Palavra-Chave ASCE: Anywhere Web of Science: Topic Enginnering Village: All Fields
Crítérios de exclusão	Foram excluídos artigos que não tratam sobre a integração entre ACV e <i>IoT</i> ; Foram excluídos artigos cujos termos de busca tem outro significado senão: <i>IoT</i> = Internet of Things e LCA = Life Cycle Assessment

Fonte: elaborado pelo autor.

RESULTADOS

A pesquisa bibliográfica realizada resultou em seis artigos relevantes que tratam de *IoT* e ACV. Pesquisadores estão discutindo o potencial uso de *IoT* na ACV (Mashhadi & Behdad, 2017) e em diversas aplicações, como: no gerenciamento de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (Gu, Ma, Guo, Summers, & Hall, 2017), na etapa de fabricação de sistemas solares (Tu, Chung, Chiu, Chung, & Tzeng, 2017), para minimizar o consumo de energia (Arshad, Zahoor, Shah, Wahid, & Yu, 2017; Tao et al., 2014; Zuo, Tao, & Nee, 2018). Porém, há poucos estudos que tratam da aplicação de Internet das Coisas na ACV com foco em edificações.

O crescimento da Indústria 4.0 pode impor novas mudanças e restrições para ACV (Mashhadi & Behdad, 2017). A tecnologia *IoT* pode proporcionar a coleta de dados de consumo de energia e impacto ambiental em tempo real, inteligente e dinâmica, abrangendo a multi-estrutura (ex: desde partes e componentes do produto) e multi-níveis (ex: projeto, fabricação, transporte, uso e reciclagem) da avaliação de todo o ciclo de vida do produto (Tao et al., 2014).

No quadro conceitual de ACV, cada máquina ou processo de fabricação teria um agente de rastreamento ambiental interconectado que registra e relata *inputs* e *outputs* em

tempo real. Os protocolos de comunicação como *MTconnect* e *RFID* podem facilitar a gravação de dados, de modo que os dados possam ser processados em uma unidade de processamento (Mashhadi & Behdad, 2017).

Tu et al (2017) propuseram uma nova abordagem de gerenciamento e estimativa de pegada de carbono baseado em *IoT*, aplicado durante a etapa de fabricação de painéis fotovoltaicos. Para tal, utilizaram o *EPCglobal network* como plataforma da tecnologia *IoT* por suportar as operações lógicas baseadas em *RFID*.

ARQUITETURA IOT BASEADA EM ACV

A arquitetura de *IoT* baseada na ACV, com foco em consumo de energia, proposta por Zuo, Tao e Nee (2018), pode ser constituída pelas camadas de:

- i) Camada de coleta de serviços: agrupa métodos, algoritmos, informações de consumo de energia do material, processo de fabricação, peça padrão, etc., dos provedores e documenta-os em serviços padronizados, que são registrados e depositados na nuvem.
- ii) Camada Nuvem: é o ambiente de troca de dados abrangente e padronizado que mantém toda a informação e conhecimento ao longo de todo o ciclo de vida do produto;
- iii) Camada de gerenciador de serviços: fornece funções ou serviços para os usuários gerenciarem, acessarem e solicitarem serviços;

Camada de usuários: são definidos como os interessados que exigem serviços. Os usuários são conectados à nuvem por meio de interfaces de usuário baseadas em navegador, que coletam várias solicitações de serviço dos usuários e as documentam em um formato padronizado. As solicitações de serviço documentadas são então entregues à camada do gerenciador de serviços.

Camada IoT: é responsável por detectar o processo do ciclo de vida do produto físico, permitindo que eles estejam conectados à rede mais ampla e coletando e processando os dados;

Camada de ciclo de vida de fabricação física: contém o ambiente físico e as atividades físicas realizadas em todo o ciclo de vida do produto.

Em suma, a arquitetura de *IoT* baseada em ACV possui 4 camadas principais: (i) percepção, que consiste na coleta de dados em tempo-real, através de *RFID*, wireless, mobile e sensores, *embedded object logic*, objeto *ad-hoc networking*, e infraestrutura de informação baseada na internet; (ii) dados; (iii) serviços, que consistem no serviços básicos, computacionais e de análise e avaliação e; (iv) aplicação, que consiste no fornecimento de dados da avaliação para diferentes usuários (Tao et al., 2014) conforme explicita a tabela 2.

Tabela 2: Estrutura de Internet das Coisas baseada em Avaliação de Ciclo de Vida.

Camadas	Sub-Camadas	Exemplos
Camada de Percepção	Atividades de Fabricação	Processo (Torno, Máquinas, Equipamentos, Operador) Workshop (Materiais, Pessoal) Linhas de Produção (Equipamentos de Computação)
	Coleta	Medidor inteligente RFID Sensores de Fibra ótica
	Comunicação	2G / 3G / 4G Wireless Satellite
Camada de Dados	Dados de avaliação	Indicadores ambientais Indicadores de consumo de recursos
	Dados básicos do empreendimento	Usuários Materiais Processos Equipamentos
	Dados de todo o ciclo de vida do produto	Sistema
Camada de serviços	Sistemas de serviços básicos	Gerenciamento de usuários Gerenciamento de funções Entrada e atualização de dados
	Serviços Computacionais e cálculos	Modelo de partes do ciclo de vida Cálculo da caracterização e normalização Cálculo do impacto ambiental
	Serviços de análise e avaliação	Avaliação ambiental Avaliação das partes Avaliação ponderada Análise da estrutura Análise do potencial de economia de energia Análise dos resultados da avaliação
Camada de Aplicações	Usuários	Empreendedores Governantes Pessoas Outros

Fonte: traduzido e adaptado de Tao et al (2014)

PRINCIPAIS BENEFÍCIOS

A intensa interconexão fornecida pela Internet das Coisas permite que os *avatares* do *cyber-espço* das máquinas sejam marcados e monitorados, bem como, permite acompanhar quaisquer entradas ou saídas, e avaliar os impactos correspondentes, individualmente e em tempo real. A rastreabilidade fornecida pela *IoT* deve permitir que as ACVs futuras possam avaliar os impactos ambientais em qualquer nível em relação aos processos, produtos, regiões ou durações (Mashhadi & Behdad, 2017).

Os benefícios do uso da *IoT* na ACV de um modelo de painel fotovoltaico de *single-silicon* produzido em Taiwan, foram comprovados por Tu et al (2017). Os resultados da pesquisa revelaram que houve uma significativa redução do tempo e custo de trabalho durante a coleta de dados e auditoria da ACV, além da melhoria na qualidade e precisão dos dados.

PRINCIPAIS APLICAÇÕES

A *IoT* está revolucionando as atividades da vida diária, monitorando diferentes cenários e decisões inteligentes para melhorar o estilo de vida e proteger o meio ambiente. Existem numerosas aplicações da *IoT* na vida diária, dentre as que se relacionam à área de AEC estão (Arshad et al., 2017):

- *Smart Homes*: as tecnologias *IoT* podem ser utilizadas em diversas situações para monitorar as atividades dos habitantes e tomar decisões que podem, por exemplo, poupar energia;
- Transporte: possibilidade de rastreamento de veículos e produtos que utilizam *RFIDs* e sensores, da fonte para destino em tempo real;
- Cidades inteligentes: a cidade é uma combinação de diferentes domínios inteligentes como transporte inteligente, mecanismo inteligente de economia de energia, segurança inteligente e muito mais.

DISCUSSÃO

Esta pesquisa revelou que a tecnologia *IoT* pode apoiar a ACV de edificações, proporcionando a coleta de dados de consumo de energia e impacto ambiental em tempo real, inteligente e dinâmica, abrangendo a multiestrutura, desde partes e componentes do produto, até multi-níveis, como no projeto, fabricação, transporte, uso e reciclagem. Além disso, o uso da *IoT* na ACV pode reduzir significativamente o tempo e custo de trabalho durante a coleta de dados e auditoria da ACV, e melhorar a qualidade e precisão dos dados.

O desenvolvimento de novas tecnologias está revolucionando e automatizando todos os setores da atividade humana. Internet das Coisas já é uma realidade ímpar presente no dia-a-dia das pessoas, principalmente com o constante uso de celular. Deste modo, *IoT* pode também ser utilizada para facilitar a Avaliação de Ciclo de Vida, e o presente estudo mostrou que são inúmeros os benefícios desta integração.

A integração de *IoT* e ACV de edificações pode trazer inúmeros benefícios para todos os agentes envolvidos na construção civil sustentável. A possibilidade de obtenção de resultados rápidos e confiáveis sobre o desempenho ambiental dos edifícios, pode auxiliar tanto o especialista ACV, gestores de *facilities* e simuladores de desempenho energético, quanto os projetistas, durante a tomada de decisão e opção por estratégias soluções mais sustentáveis.

O uso de tecnologias *IoT*, para a percepção inteligente em tempo real e a coleta de dados de impacto ambiental gerados com ênfase na edificação, agrega conhecimento para a temática de cidades sustentáveis e inteligentes. A rastreabilidade fornecida pela *IoT* deve permitir que as ACVs futuras possam avaliar os impactos ambientais em qualquer nível a em relação aos processos, produtos, regiões ou durações. Além disso, o suporte inteligente à ACV de edificações é algo extremamente inovador.

O uso de Internet das Coisas para apoiar a Avaliação do Ciclo de Vida de edificações é muito promissor e inovador. Entretanto, percebe-se que os estudos nesta área ainda são muito abrangentes, e são necessários estudos mais específicos de como esta integração pode ser realizada, principalmente voltada ao setor de arquitetura, engenharia e construção. Quanto à difusão do conhecimento, esta pesquisa pode ser usada como referência e apoio à geração de conhecimento em campos práticos e teóricos.

REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. de N. T. (2009a). *NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*. Rio de Janeiro.
- ABNT, A. B. de N. T. (2009b). *NBR ISO 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações*. Rio de Janeiro.
- Arshad, R., Zahoor, S., Shah, M. A., Wahid, A., & Yu, H. (2017). *Green IoT: An Investigation on Energy Saving Practices for 2020 and Beyond*. *IEEE Access*, 5, 15667–15681. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2686092>
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2010.05.010>
- Bauman, H., & Tillman, A.-M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA* (1st ed.). Estados Unidos: Lightning Source.
- Bradicich, T. (2017). What the intelligent edge is and why it's useful | HPE | HPE™. Retrieved March 20, 2018, from <https://www.hpe.com/us/en/insights/articles/the-intelligent-edge-what-it-is-what-its-not-and-why-its-useful-1704.html>
- Chase, J. (2013). The evolution of the Internet of Things. *Texas Instrum.*, p. p.7.
- European Commission. (2008). *Internet of Things in 2020: Roadmap for the Future*.
- European Commission. (2010). *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *Introduction to LCA with SimaPro* (5.2). California, USA.
- Gu, F., Ma, B., Guo, J., Summers, P. A., & Hall, P. (2017). Internet of things and Big Data as potential solutions to the

problems in waste electrical and electronic equipment management: An exploratory study. *Waste Management*, 68, 434–448. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.037>

- Guinée, J. B. (2002). *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Marconi, M. de A., & Lakatos, E. M. (2010). *Fundamentos de metodologia científica* (7th ed.). São Paulo: Atlas.
- Mashhadi, A. R., & Behdad, S. (2017, December). Ubiquitous Life Cycle Assessment (U-LCA): A Proposed Concept for Environmental and Social Impact Assessment of Industry 4.0. *Manufacturing Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.12.012>
- Miorandi, D., Sicari, S., De Pellegrini, F., & Chlamtac, I. (2012). Internet of things: Vision, applications and research challenges. *Ad Hoc Networks*, 10(7), 1497–1516. <https://doi.org/10.1016/J.ADHOC.2012.02.016>
- Ozdemir, V., & Hekim, N. (2018). Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, “The Internet of Things” and Next-Generation Technology Policy. *Journal of Integrative Biology*, 22(1). <https://doi.org/DOL:10.1089/omi.2017.0194>
- Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., & Georgakopoulos, D. (2014). Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 414–454. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.042313.00197>
- Reap, J., Roman, F., Duncan, S., & Bras, B. (2008). A survey of unresolved problems in life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess*, (13), 290–300. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0008-x>
- Rist, T. (2011). *A path to BIM-based LCA for whole-buildings*. Norwegian University of Science and Technology, Spring.
- Schlueter, A., & Thesseling, F. (2009). Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Automation in Construction*, 18(2), 153–163.
- Tao, F., Zuo, Y., Xu, L. Da, Lv, L., & Zhang, L. (2014). Internet of things and BOM-Based life cycle assessment of energy-saving and emission-reduction of products. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1252–1261. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2306771>
- Tu, M., Chung, W. H., Chiu, C. K., Chung, W., & Tzeng, Y. (2017). A novel IoT-based dynamic carbon footprint approach to reducing uncertainties in carbon footprint assessment of a solar PV supply chain. In *2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)* (pp. 249–254). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IEA.2017.7939216>
- Zuo, Y., Tao, F., & Nee, A. Y. C. (2018). An Internet of things and cloud-based approach for energy consumption evaluation and analysis for a product. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(4–5), 337–348. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1285429>