

# ESTRUTURA DE REFERÊNCIA PARA A MEDIAÇÃO DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA PELA INTERNET DAS COISAS

*REFERENCE FRAMEWORK FOR MEDIATION OF LIFE CYCLE ASSESSMENT BY INTERNET OF THINGS*

*MARCO DE REFERENCIA PARA LA MEDIACIÓN DE LA ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA POR INTERNET DE LAS COSAS*

Natália Nakamura Barros<sup>1</sup>, Regina Coeli Ruschel<sup>1</sup>

## RESUMO:

Uma das principais dificuldades para adoção da Avaliação do Ciclo de Vida de edificações (ACVed) refere-se à coleta, armazenamento e estruturação de dados, para realização do cálculo ambiental e posterior visualização dos resultados. IoT têm o potencial de trazer maior precisão à coleta de dados para realização da ACV. Para concretizar isso, os sistemas IoT precisam ser projetados com as melhores práticas de escalabilidade, interoperabilidade e capacidade de composição. Um modelo estrutural pode fornecer blocos de construção fundamentais para esta integração. A presente pesquisa tem como objetivo principal propor um modelo estrutural para a integração entre IoT e ACV, explicitando alternativas de abordagens e padrões tecnológicos que viabilizam o suporte à ACV pela IoT. Para tal, o método estruturalista foi aplicado com o seguinte delineamento: identificação dos elementos para integração a partir de uma Revisão Sistemática da Literatura de propostas integrativas destas temáticas, conceituação, estabelecimento das relações entre os elementos, elaboração do modelo estrutural e análise. Os elementos foram classificados em 12 categorias que realizam a aproximação das temáticas, sendo estas: framework, product, collect, communication, data, storage, service, application, goal and scope definition, life cycle inventory, life cycle impact assessment e interpretation. O modelo pode ser utilizado por agentes interessados em mediar ACV com a IoT, proporcionando-lhes uma compreensão geral das alternativas de integração dependendo do escopo da avaliação e desenvolvimento de tecnologia. Além disso, o modelo desenvolvido pode ser utilizado para benchmarking de trabalhos relacionados ao tema ou alternativas de implementação.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo integrativo; arquitetura IoT; coleta de dados; benchmarking.

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

## Fonte de Financiamento:

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88882.435512/2019-01

## Conflito de Interesse:

Não há.

## Ética em Pesquisa:

Não há necessidade.

**Submetido em:** 14/04/2023

**Aceito em:** 21/03/2024

How to cite this article:

BARROS, N.N.; RUSCHEL, R.C. Estrutura de referência para a mediação da Avaliação do Ciclo de Vida pela Internet das Coisas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v19, n2, 2024. <https://doi.org/10.11606/gtp.v19i2.210600>



## **ABSTRACT:**

*One of the main difficulties in adopting the Life Cycle Assessment of buildings (ACVbd) is collecting, storing and structuring data to carry out the environmental calculation and subsequent visualization of the results. IoT has the potential to bring greater precision to data collection for LCA. IoT systems must be designed with best practices for scalability, interoperability, and composability to achieve this. A structural model can provide fundamental building blocks for this integration. The main objective of this research is to propose a structural model for integrating IoT and LCA, explaining alternative approaches and technological standards that enable support for LCA through IoT. To this end, the structuralist method was applied with the following design: identification of the elements for integration based on a Systematic Literature Review of integrative proposals for these themes, conceptualization, establishment of relationships between the elements, elaboration of the structural model and analysis. The elements were classified into 12 categories that approximate the themes: framework, product, collect, communication, data, storage, service, application, goal and scope definition, life cycle inventory, life cycle impact assessment and interpretation. The model can be used by agents interested in mediating LCA with IoT, providing them with a general understanding of integration alternatives depending on the scope of technology assessment and development. Furthermore, the developed model can benchmark works related to the topic or implementation alternatives.*

**KEYWORDS:** *integrative model; IoT architecture; data collection; benchmarking.*

## **RESUMEN:**

*Una de las principales dificultades a la hora de adoptar el Análisis del Ciclo de Vida de los edificios (ACVed) es la recogida, almacenamiento y estructuración de datos para realizar el cálculo ambiental y posterior visualización de los resultados. IoT tiene el potencial de aportar mayor precisión a la recopilación de datos para ACV. Los sistemas de IoT deben diseñarse con las mejores prácticas de escalabilidad, interoperabilidad y componibilidad para lograrlo. Un modelo estructural puede proporcionar elementos fundamentales para esta integración. El principal objetivo de esta investigación es proponer un modelo estructural para la integración de IoT y ACV, explicando enfoques alternativos y estándares tecnológicos que permitan soportar ACV a través de IoT. Para ello se aplicó el método estructuralista con el siguiente diseño: identificación de los elementos para la integración a partir de una Revisión Sistemática de la Literatura de propuestas integradoras para estos temas, conceptualización, establecimiento de relaciones entre los elementos, elaboración del modelo estructural y análisis. Los elementos se clasificaron en 12 categorías que se aproximan a los temas: framework, product, collect, communication, data, storage, service, application, goal and scope definition, life cycle inventory, life cycle impact assessment and interpretation. El modelo puede ser utilizado por agentes interesados en mediar el ACV con IoT, proporcionándoles una comprensión general de las alternativas de integración dependiendo del alcance de la evaluación y el desarrollo de la tecnología. Además, el modelo desarrollado puede comparar trabajos relacionados con el tema o alternativas de implementación.*

**PALABRAS CLAVE:** *modelo integrador; arquitectura IoT; recolección de datos; benchmarking.*

## INTRODUÇÃO

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) constitui uma técnica para investigar sistematicamente impactos oriundos das interações entre o ambiente e atividades humanas (Guinée et al., 2002). Os impactos da ACV de edificações referem-se à extração da matéria-prima, fabricação, construção, operação, desconstrução de edificações e destinação final dos resíduos correspondentes.

Apesar do crescente uso da avaliação do ciclo de vida de edificações (ACVed), a adoção no Brasil ainda enfrenta uma série de barreiras. Um dos principais desafios da aplicabilidade da ACVed no contexto brasileiro está relacionada à imprecisão dos dados, devido à carência de dados nacionais. A necessidade de realizar o levantamento do quantitativo de materiais manualmente e a dificuldade em encontrar informações acerca dos materiais utilizados, fornecedores e pontos de destinação final de resíduos, demanda muito tempo, esforço e custo para a realização.

A Internet das Coisas (*Internet of Things* – 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). A intensa interconexão fornecida pela IoT pode permitir, na fase de fabricação, que todas as máquinas e produtos sejam marcados e monitorados, de modo a acompanhar quaisquer entradas ou saídas, e avaliar os comportamentos 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). Já na fase operacional de edifícios, IoT pode auxiliar na coleta de dados dinâmicos e consequente obtenção de resultados de impactos mais precisos, de modo a fornecer melhorias à avaliação de desempenho ambiental (Silva; Passuello, 2023).

Deste modo, a IoT pode ser empregada para obter coleta dinâmica e em tempo real dos dados de impactos ambientais gerados em todo o ciclo de vida do produto. Além disso, várias funções e dados necessários na ACV podem ser incluídos em serviços IoT que são gerenciados em um servidor em nuvem (Zuo; Tao; Nee, 2018). A IoT onipresente do futuro tornará possível para praticamente qualquer objeto ao nosso redor trocar informações e trabalhar em sinergia para aumentar drasticamente a qualidade de vida (European Commission, 2008).

IoT têm o potencial de dar suporte a ACV. Para concretizar isso, os sistemas IoT precisam ser projetados com as melhores práticas de escalabilidade, interoperabilidade e capacidade de composição. Deste modo, partimos dos seguintes questionamentos: Quais são as partes constituintes críticas de um sistema de IoT voltado à ACV? Quais são os elementos que são necessários para implementar um sistema IoT para ACV? Como os elementos da IoT se relacionam aos elementos da ACV?

Uma estrutura de referência pode responder a essas questões fornecendo blocos de construção fundamentais. A presente pesquisa tem como objetivo principal propor um modelo estrutural para a integração entre IoT e ACV, explicitando alternativas de abordagens e padrões tecnológicos que viabilizam o suporte à ACV pela IoT.

## FUNDAMENTAÇÃO

### INTERNET DAS COISAS

O termo "Internet das Coisas" foi cunhado pelos fundadores do MIT Auto-ID Center original, 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. Uma das principais tecnologias Auto-ID é a identificação por radiofrequência (Radio-Frequency Identification - RFID) (European Commission, 2010).

O clímax do reconhecimento do Auto-ID Center ocorreu em setembro de 2003, quando o Simpósio Executivo Electronic Product Code (EPC) em Chicago (Illinois, EUA) marcou o lançamento oficial da EPC Network, que consiste em uma infraestrutura de tecnologia aberta que permite que os computadores identifiquem objetos feitos pelo homem e acompanhe-os enquanto fluem da fábrica para o centro de distribuição e para as prateleiras das lojas (European Commission, 2010).

Algumas semanas após o Simpósio, em outubro de 2003, o MIT Auto-ID Center foi rebatizado como Cambridge Auto-ID Lab e dividido em um braço de pesquisa - o Auto-ID Labs - e um braço comercial - EPCglobal (European Commission, 2010). O objetivo do Auto-ID Labs era criar não apenas uma rede que conecta computadores a objetos, mas também auxiliar no desenvolvimento de hardware acessível, software e protocolos de rede e linguagens para descrever objetos de maneiras que os computadores possam entender (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

A IoT pode ser definida a partir de três perspectivas: orientada para as coisas, orientada para a rede e orientada à semântica (Atzori; Iera; Morabito, 2010). Considerando a perspectiva orientada para as coisas, 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" (European Commission, 2008, p. 4). Uma definição diferente, orientada para a rede, poderia ser formulada como "Objetos interconectados tendo um papel ativo no que pode ser chamado de Internet do Futuro" (European Commission, 2008, p. 4). Já a perspectiva semântica congrega o entendimento conjunto de Internet e Coisa. Assim, semanticamente, Internet das Coisas significa "uma rede mundial de objetos interconectados exclusivamente endereçáveis, baseada em protocolos de comunicação padrão" (European Commission, 2008, p. 4).

A IoT refere-se a um ambiente de computação hiperconectado, que está transformando coletivamente como os dados, o conhecimento e a inovação são atualmente produzidos e consumidos. Não apenas os seres humanos e outros organismos vivos, mas virtualmente qualquer objeto, animado ou inanimado, podem estar conectados à IoT e interagem uns com os outros através de sensores e conectividade sem fio, rastreados em tempo real e em um estado de aprendizado constante da Big Data. Os mundos virtual, físico e biológico tornaram-se, assim, integrados, criando os sistemas cyber-físicos (CPS) (Ozdemir; Hekim, 2018).

### AValiação DO CICLO DE VIDA

Em 2009, a ACV foi normatizada no Brasil pelas NBR ISO 14040: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a) e NBR ISO 14044: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b). A norma divide a ACV em quatro fases:

definição do objetivo e escopo, análise de inventário do ciclo de vida (ICV), avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação.

Apesar do crescente uso da ACVed, a adoção no Brasil ainda enfrenta uma série de barreiras. Os principais desafios da aplicabilidade no contexto brasileiro estão relacionados principalmente à qualidade de dados. Desse modo, urge a necessidade de elaboração de um banco de dados brasileiro, pois, além da inexistência de dados, os materiais existentes são geralmente modelados considerando os processos europeus de fabricação e, portanto, podem apresentar algumas divergências em relação aos brasileiros (Medeiros; Durante; Callejas, 2018).

Dados imprecisos, inexistentes ou não representativos é um problema que afeta todas as fases da ACV. Uma série de razões gerais explicam a insuficiência ou indisponibilidade de dados, como o alto custo para realizar a coleta e a preocupação quanto ao compartilhamento de informações confidenciais. Quando disponíveis, os dados externos podem ser de qualidade desconhecida, imprecisos ou desatualizados. Muitas vezes, eles não são representativos porque são retirados de processos semelhantes, mas não idênticos, sendo baseados em suposições sobre níveis de tecnologia ou usam médias (Reap et al., 2008).

A coleta de dados ocorre durante a fase de inventário. Entretanto, devido à escassez de dados, esta coleta tende a demandar muito tempo, esforço e custo (Reap et al., 2008). Os principais desafios na condução da ACV são: intensidade e qualidade dos dados, subjetividade na caracterização e avaliação do impacto ambiental, definição inadequada de unidades funcionais, pressupostos para a vida útil e vida útil do edifício, falta de procedimento para limites do sistema, falta de análise de incerteza, e limitação como ferramenta de tomada de decisão (Nwodo; Anumba, 2019).

## INTEGRAÇÃO DE IOT E ACV

A falta de informações temporais é uma limitação da ACV (Levasseur et al., 2010), que a IoT pode auxiliar. O consumo de materiais, fluxos de entrada e saída e mix de energia, variam em diferentes horizontes de tempo, devido, por exemplo, à: variação no comportamento dos ocupantes, fatores característicos dinâmicos e fatores de ponderação dinâmica. O comportamento dos ocupantes tem influência direta no desempenho ambiental da edificação. Os fatores característicos dos poluentes variam significativamente em diferentes regiões e períodos. E os fatores de ponderação são dependentes do tempo e influenciados pela economia e pela sociedade em curso (Su et al., 2017).

Collinge et al. (2011) descreveram a viabilidade de implantar uma rede de sensores sem fio em tempo real para subsidiar uma ACV dinâmica para edifícios. Dados de monitoramento do uso de eletricidade, uso de água quente e gelada, temperatura, umidade relativa, concentração de CO<sub>2</sub>, compostos orgânicos voláteis (*Volatile Organic Compound* – VOC) e ocupação foram utilizados. Os nós de sensores sem fio podem utilizar um recurso computacional que lê os dados do sensor e os armazena localmente enquanto gerencia a interface de rede sem fio. Cada nó pode, então, comunicar esses dados a outros nós na rede de sensores. A rede trabalharia em estreita colaboração com o banco de dados de ACV, aproveitando os metadados pré-computados, gerando novas análises de diferentes cenários, bem como metadados adicionais para recuperação posterior (Collinge et al., 2011).

Rickenbacker et al. (2016) e Collinge et al. (2018) realizaram o monitoramento em tempo real de ozônio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, temperatura, umidade relativa, VOC, carbono negro e partículas. O monitoramento foi realizado em seis edifícios comerciais representativos, no campo de 72 horas, para realizar uma ACV dinâmica. Os dados coletados pelos sensores foram combinados os com dados de ICV e processos de bases de dados.

Fórmulas foram aplicadas para cálculo do consumo de energia e consumo de combustível. Dois modelos dinâmicos de atribuição foram criados: um com resolução mensal e outro com resolução horária (Collinge et al., 2018; Rickenbacker et al., 2016).

Tu et al. (2017) propuseram uma abordagem de pegada de carbono dinâmica baseada em IoT. A emissão de carbono e as informações de fabricação de um painel fotovoltaico foram capturadas por medidores de energia e sensores IoT em tempo real, armazenadas na nuvem e, a partir deste dados, a pegada de carbono foi calculada. Ross e Cheah (2017) examinaram padrões de comportamento de usuário com base em dados de temperatura, umidade, iluminação, movimento e ruído de 15 escritórios em uma universidade em Cingapura. Os dados coletados permitiram uma análise de tendências do uso do sistema de resfriamento x ocupação da sala.

Os estudos demonstraram que os modelos dinâmicos foram mais adequados e houve uma mudança significativa dos impactos principalmente durante a fase de uso, em comparação à ACV estática (Collinge et al., 2018). Os diferentes padrões de comportamento do usuário podem produzir grandes diferenças nos resultados de uma ACV (Ross; Cheah, 2017). Além disso, a abordagem IoT superou a tradicional em termos de economia de tempo e custo nas tarefas de coleta de dados e auditoria e, melhoria na precisão e qualidade dos dados (Tu et al., 2017).

Apesar do número crescente de artigos sobre IoT e ACV, a maioria concentra-se principalmente no consumo de energia durante a fase de fabricação de produtos (Garcia-Muiña et al., 2018; Jayapal; Kumaraguru, 2018; Mahalik; Au, 2008; Zuo; Tao; Nee, 2018). São poucos os estudos que têm como foco edificações. A adoção da IoT é muito promissora, entretanto a tecnologia ainda necessita de ajustes para ser utilizada no auxílio à ACV de edificações (Atzori; Iera; Morabito, 2010). Um modelo pode ser utilizado por agentes interessados em mediar ACV de edificações com a IoT, proporcionando-lhes uma compreensão geral das alternativas de integração dependendo do escopo da avaliação e desenvolvimento de tecnologia.

## MÉTODO

Para o desenvolvimento do modelo estrutural para integração entre ACV e IoT, foi utilizado o método estruturalista. O estruturalismo é uma construção teórica iniciada pelo etnólogo Claude Lévi-Strauss, que se propõe a desenvolver uma teoria lógica construída a partir do real concreto (Thiry-Cherques, 2006). Pretende-se, portanto, criar uma estrutura lógica da integração entre ACV e IoT a partir de artigos relacionados ao tema. Para tal, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para buscar estas proposições e identificar os elementos de diálogo entre os sistemas IoT a ACV e suas relações. O delineamento deste método consistiu na identificação dos elementos de aproximação entre IoT e ACV, conceituação dos elementos, estabelecimento das relações entre os elementos, elaboração do modelo estrutural e análise do modelo estrutural.

## OBSERVAÇÃO

Na fase de observação, busca-se o que existe com potencial de identificação dos elementos estáveis que permitem caracterizar o universo de estudo (Thiry-Cherques, 2006). Para delimitar o universo observacional foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) com objetivo identificar estudos integrativos entre IoT na ACVed. A estratégia de RSL definiu os termos de busca, fontes de pesquisa e critérios de inclusão e exclusão de estudos. O Quadro 1 apresenta o protocolo geral de condução da RSL. As fontes utilizadas correspondem à bases de dados relevantes para a área de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), sendo estas: *Scopus*, *Engineering Village* e *Web of Science*. Os termos de busca utilizados foram

“Life Cycle Assessment”, “Internet of Things”, “IoT” e “LCA”, e o conector “and”, para os campos de título, resumo e palavras-chave. Foram analisados os documentos publicados até 2020, sendo que os repositórios apresentaram um total 446 estudos. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados os estudos que não estavam publicados em língua inglesa, sem revisão por pares, não tinham ACV e IoT como foco principal, ou não eram relacionados à Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO).

Após esta etapa, os artigos foram lidos na íntegra, e manteve-se apenas os estudos avaliados como de alta qualidade (CI3), segundo Harden e Gough (2012 *apud* Dresch; Lacerda; Antunes Junior, 2015), que constituem estudos que abordam precisamente a integração de ACV com IoT. Após a execução da RSL, outros artigos foram incluídos na amostra a partir da lista de referências da amostra, na qual verificou-se estudos de alta qualidade durante a leitura completa dos artigos.

Objetivo	Definir o campo observacional do universo de IoT e ACV de edificações	
Intervenção (Contexto/foco)	Artigos relacionados à Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO)	
População	Artigos científicos indexados em periódicos e revisados por pares	
Idioma	Inglês	
Período	Artigos publicados até 31/12/2020	
Fontes de Pesquisa	Scopus, Engineering Village and Web of Science	
String de busca	ACV + IoT	“Life Cycle Assessment” AND “Internet of Things” / “Life Cycle Assessment” AND IoT / LCA AND “Internet of Things” / LCA AND IoT
Critérios de inclusão	<b>CI1</b> - Estudos que contenham os termos da pesquisa em: Título, resumo ou palavras-chave.	
	<b>CI2</b> - Estudos escritos em inglês.	
	<b>CI3</b> – Estudos de ALTA qualidade	
Critérios de Exclusão	<b>CE1</b> - Artigos repetidos	
	<b>CE2</b> - Texto completo não disponível	
	<b>CE3</b> – Estudos sem revisão por pares	
	<b>CE4</b> - Termos utilizados adquirem outros significados não relacionados ao universo da revisão sistemática	
	<b>CE5</b> – ACV e IoT não é o foco principal do artigo	
	<b>CE6</b> - O estudo não se relaciona à AECO.	
Análise	Rede semântica dos termos mais empregados pelos autores nos títulos e resumos da amostra	
Etapas da RSL	<b>Etapa 1:</b> pesquisa de artigos nas bases de dados considerando os critérios de inclusão CI1 e CI2	
	<b>Etapa 2:</b> exclusão de artigos atendem aos critérios de exclusão CE1, CE2 e CE3	
	<b>Etapa 3:</b> exclusão de artigos que atendem aos critérios de exclusão CE4, CE5 e CE6	
	<b>Etapa 4:</b> Inclusão de artigos que atendem ao critério de inclusão CI3	

**Quadro 1.** Protocolo geral de condução da Revisão Sistemática de Literatura

**Fonte:** as autoras.

## DECOMPOSIÇÃO EM ELEMENTOS

O método quantitativo foi utilizado para encontrar os principais elementos de diálogo entre ACV e IoT por meio da recorrência de palavras na amostra. Os artigos foram carregados no software Atlas Ti para verificação da frequência de elementos baseada em dados de texto em todos os documentos, através da ferramenta “Lista de palavras”. Foram excluídas palavras de um caractere, números, hífen e sublinhados. Elementos com porcentagem de 0,10% em relação ao total de elementos do conjunto amostral foram selecionados. Elementos duplicados e outros, como pronomes, preposições, advérbios, conjunções, artigos, numerais, adjetivos e verbos, foram excluídos automaticamente da lista pelo Atlas Ti. Os elementos foram novamente analisados para eliminar elementos no plural e outros que apresentam muita similaridade na grafia, como *environment* e *environmental*.

## CONCEITUAÇÃO DOS ELEMENTOS

Na conceituação, buscou-se significar e categorizar os elementos (Thiry-Cherques, 2006). Nesta etapa, foram utilizados métodos qualitativos, como a codificação teórica, utilizada para interpretação de textos com o objetivo de expressar dados e fenômenos na forma de conceitos (Flick, 2004). Na leitura completa dos artigos, os elementos são transformados em códigos identificando-se trechos do texto que explicam os elementos (codificação aberta). Aprimora-se essa codificação marcando-se conceitos ou enunciados centrais nela e identificando-se as relações entre os elementos (codificação axial). Os elementos foram classificados e, finalmente, as ideias foram agrupadas (codificação seletiva). A análise global ocupa-se em resumir o texto e julgar por sua inclusão ou não no modelo (Flick, 2004).

A codificação aberta foi realizada sobre a amostra no Atlas Ti. A partir dos 76 elementos selecionados, foi realizada a codificação automática nos 20 documentos da amostra. A codificação automática fez varredura nos textos para identificar toda e qualquer ocorrência isolada de um elemento - identificado anteriormente na fase de decomposição - numa frase. O local onde se verificava a ocorrência do elemento era marcado com uma quotation (citação). As citações geradas pela codificação automática do documento foram redimensionadas de modo que se concentrassem apenas no texto do documento, excluindo o nome dos autores, informações sobre os autores, nome da publicação, título, resumo, palavras-chave, figuras, tabelas, referências, notas de rodapé, anexos e apêndices.

Uma leitura minuciosa na íntegra dos textos foi realizada. Os códigos foram readequados, alguns, que não eram muito significativos foram excluídos e outros foram gerados. A partir da leitura completa dos textos, buscou-se os significados dos elementos. Os elementos foram classificados em categorias conforme proximidade conceitual.

## ELABORAÇÃO DO MODELO

Um modelo é uma teoria específica sobre o comportamento de elementos de uma determinada classe. Um modelo enuncia a maneira em que os elementos de uma estrutura concreta se mantêm unidos (Thiry-Cherques, 2006). Em um primeiro momento, os elementos essenciais da temática de ACV e IoT foram determinados e ordenados. A partir dos conceitos principais de cada elemento, as relações foram estabelecidas, considerando as propriedades disponíveis no Atlas Ti, sendo estas: simétricas, assimétricas ou transitivas.

Nesta etapa, um intenso trabalho de leitura das citações foi realizado para qualificar as relações entre os elementos apontadas na codificação axial. À medida que a leitura avançou, novas relações foram estabelecidas e algumas desfeitas, até alcançar a saturação teórica.

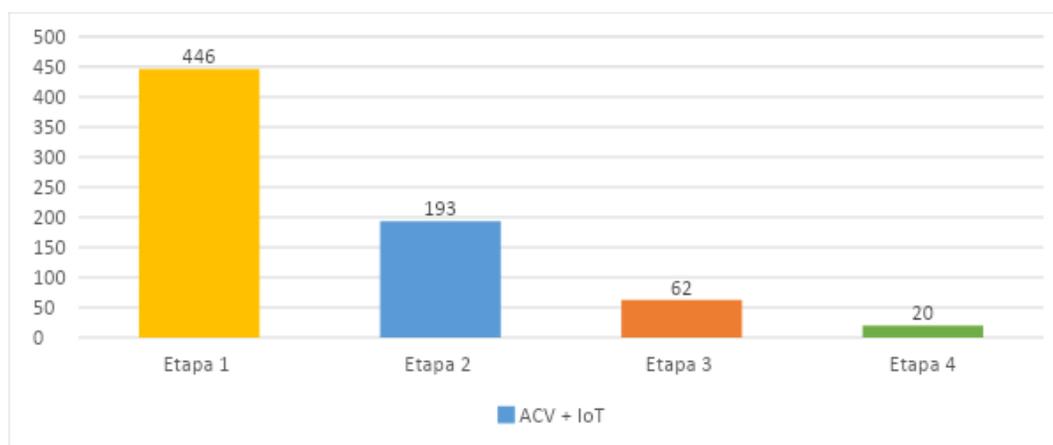
## ANÁLISE INTERPRETATIVA

A análise interpretativa consistiu em realizar experimentos com o modelo para avaliar sua capacidade explicativa, o conhecimento nele contido e o como aplicá-lo. Realizamos exercícios para verificar seu potencial para expressar a organização de soluções aplicadas em estudos fora da base observacional. Também se utilizou o modelo para fazer a comparação entre soluções de IoT aplicadas a ACV.

## RESULTADOS

### OBSERVAÇÃO

Esta seção apresenta o campo observacional do universo de IoT na ACV utilizado. A Figura 1 mostra a evolução da quantidade de artigos resultantes em cada etapa da RSL.



**Figura 1.** Nº de artigos resultantes em cada etapa da RSL

Fonte: as autoras.

A amostra resultante da etapa de observação está apresentada no Quadro 2. Esta amostra foi utilizada como base para o desenvolvimento das demais etapas do método estruturalista.

2008 - 2012	2013-2016	2017-2020
(Mahalik; Au, 2008) (Levasseur <i>et al.</i> , 2010) (Collinge <i>et al.</i> , 2011)	(Tao <i>et al.</i> , 2014b) (Wu <i>et al.</i> , 2014) (Wang; Wang, 2015) (Rickenbacker <i>et al.</i> , 2016)	(Mashhadi; Behdad, 2017) (Ross; Cheah, 2017) (Su <i>et al.</i> , 2017) (Tu <i>et al.</i> , 2017) (Barni <i>et al.</i> , 2018) (Collinge <i>et al.</i> , 2018) (Garcia-Muiña <i>et al.</i> , 2018) (Jayapal; Kumaraguru, 2018) (Zuo; Tao; Nee, 2018) (Hagen <i>et al.</i> , 2020) (Koura <i>et al.</i> , 2020) (Sharma; Panwar, 2020) (Zhang <i>et al.</i> , 2020)

**Quadro 2.** Amostra resultante da RSL por período

Fonte: as autoras.

Dos 20 artigos resultantes, parte destes propuseram arquiteturas IoT para suporte a ACV e outros concentraram-se na aplicação da IoT para incremento a ACV.

Dos autores que propuseram arquiteturas IoT para suporte a ACV, Tao et al. (2014) propuseram uma Arquitetura Orientada a Serviços (Service-Oriented Architecture – SOA), para ACV na fabricação de produtos. Zhang et al. (2020) propuseram um sistema baseado em Blockchain. Barni et al. (2018) propuseram uma estrutura de otimização industrial a partir da integração entre IoT e digital twin. Hagen et al. (2020) sugeriram uma implementação metodológica da ACV com o suporte da estrutura de sistemas de produção ciber-físicos (CPPS).

Dos autores que se concentraram no monitoramento IoT para coleta de dados para ACV, Jayapal e Kumaraguru (2018) desenvolveram um dispositivo baseado em IoT para medir o consumo de energia de equipamentos usados na fabricação de produtos. Koura et al. (2020) utilizaram dados de medição para comparar os impactos ambientais do ciclo de vida do telhado com lastro de cascalho e do telhado verde. Wu et al. (2014) propuseram o uso de sistemas RFID para coleta e comunicação dos dados. Collinge et al. (2011) descreveram a viabilidade de implantar uma rede de sensores sem fio em tempo real para gerar uma ACV dinâmica para edifícios. Rickenbacker et al. (2016) e Collinge et al. (2018) realizaram o monitoramento em tempo real em seis edifícios comerciais representativos, no campo de 72 horas, para desenvolver uma ACV dinâmica. Tu et al. (2017) propuseram uma abordagem de pegada de carbono dinâmica baseada em IoT referente à fabricação de um painel fotovoltaico.

### DECOMPOSIÇÃO E CONCEITUAÇÃO

Esta seção fornece uma visão geral dos elementos fundamentais para representar a integração entre IoT e ACV. Os principais elementos comuns dos sistemas de IoT voltados à ACV foram divididos 12 categorias. As categorias foram organizadas no formato de tabela periódica, cuja classificação se deu devido à proximidade conceitual entre os elementos, conforme mostrado na Figura 2. Na Figura 2 à esquerda, encontram-se as categorias relacionadas à ACV: *Goal and scope definition, Life Cycle Inventory, Life Cycle Impact Assessment e Interpretation*. À direita, encontram-se as categorias relacionadas à IoT: *framework, product, collect, communication, data, storage, service e application*. As categorias de elementos de IoT estão relacionadas às principais funções das arquiteturas IoT encontradas na RSL. Já as categorias de elementos de ACV estão organizadas segundo os fundamentos do processo de avaliação.

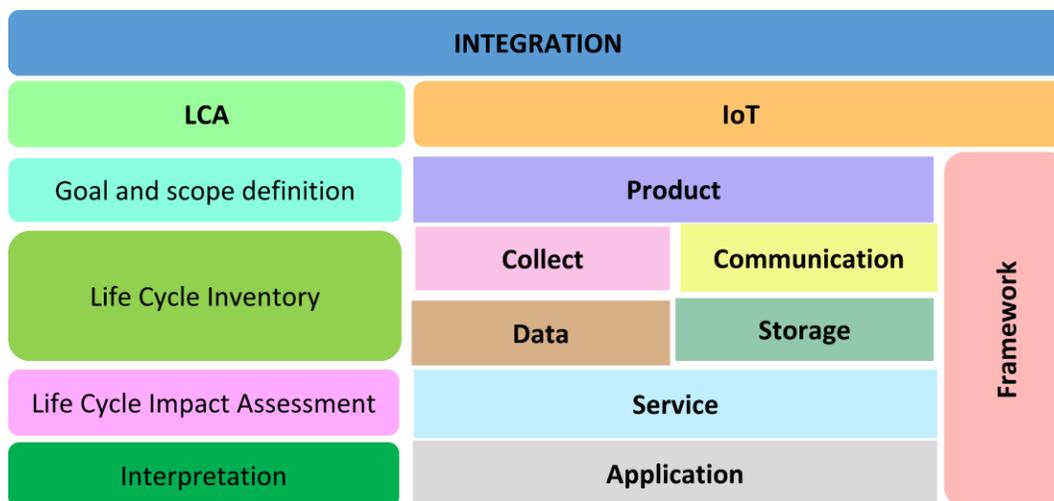


Figura 2. Diagrama das categorias da estrutura de integração entre IoT e ACV

Fonte: as autoras.

Cada uma dessas categorias se expande em elementos distintos de um ecossistema de ACV com IoT. A ordenação dos elementos dentro de cada categoria representa um detalhamento, do geral para o específico, ou um encadeamento, conforme apresentado na Figura 3.

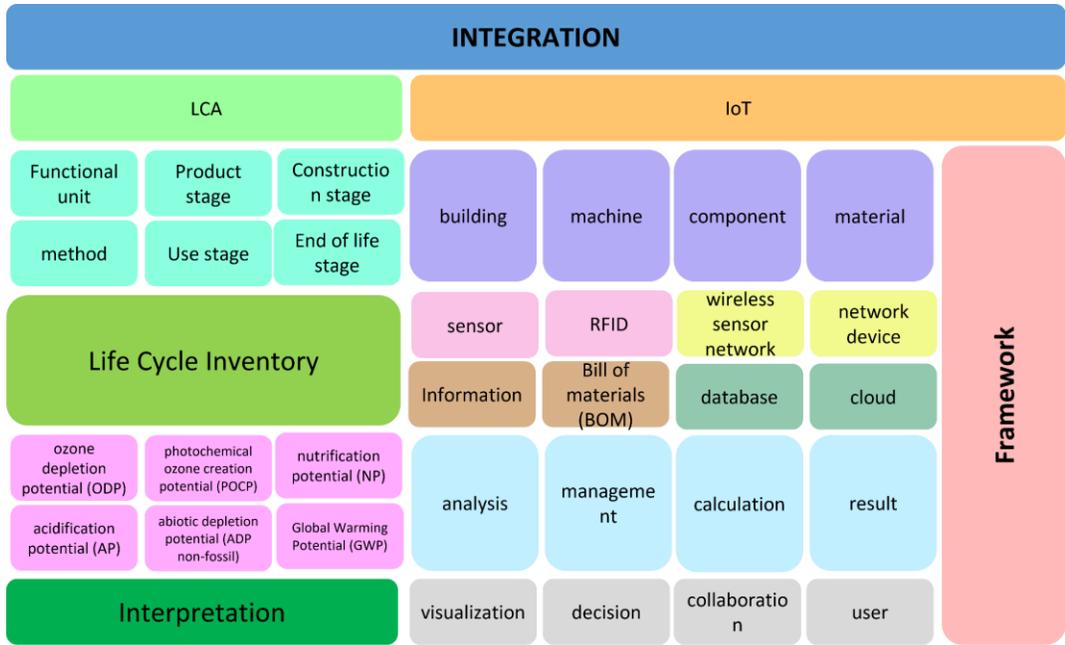


Figura 3. Tabela periódica dos elementos do ecossistema de IoT com ACV

Fonte: as autoras.

**Goal and scope definition** refere-se à fase da ACV na qual se define a unidade funcional, limites do sistema, métodos de análise, que auxiliarão no desenvolvimento da ACV. Além disso, nesta etapa, define-se o produto e o estágio do ciclo de vida a ser avaliado, tais como: fase de projeto; estágio de produção, que abrange a extração da matéria-prima, fabricação do produto e transporte; construção; estágio de uso, que abarca também a manutenção, reparo e substituição e; estágio de fim-de-vida, que abrange a demolição, disposição e processamento de resíduos.

**Life Cycle Inventory** é caracterizada principalmente pela coleta e armazenamento de dados. **Life Cycle Impact Assessment** é responsável por transformar os resultados da análise de inventário em resultados ambientalmente relevantes, relacionando-os a impactos específicos, como potencial de depleção abiótica (ADP non-fossil), potencial de criação do ozônio fotoquímico (POCP), potencial de nutrificação (NP), potencial de acidificação (AP) e potencial de aquecimento global (GWP). Na **Interpretation**, o resultado obtido na fase anterior é analisado e visualizado pelos usuários para auxiliar na tomada de decisão.

Quanto às categorias de elementos associados à IoT destacamos primeiramente a categoria **Product** que contém todos os dispositivos físicos da edificação que fazem parte do escopo da ACV. É composta pelas máquinas, equipamentos e produtos da edificação. Sensores e *tags* são conectados às máquinas e equipamentos, realizando a coleta de dados, tais elementos concentram-se na categoria **Collect**. Esta coleta gera uma série de dados (categoria **Data**), que são enviados por redes de comunicação (categoria **Communication**) através de dispositivos de rede. Os dados são então armazenados (categoria **Storage**) em repositórios na nuvem, adquirindo persistência e formando uma base de dados.

A categoria **Services** concentra os elementos relacionados aos cálculos e análises de modo a obter os resultados. Estes são então reportados para o usuário (categoria **Application**) que os visualiza e os utiliza para auxiliar na tomada de decisão.

Na categoria **Framework**, encontram-se os frameworks de arquitetura de sistema IoT voltados à ACV. Foram encontradas cinco arquiteturas IoTs, sendo estas: *Service-Oriented Architecture architecture, blockchain architecture, digital twin architecture, cyber-physical production system (CPPS) architecture e Open LCI Data Preparation*. Os nomes das arquiteturas dados pelos autores foram mantidos.

A *Service-Oriented Architecture* - SOA é uma forma de arquitetura de tecnologia que adere aos princípios de orientação a serviços. Com base na SOA, uma arquitetura IoT para ACV pode ser constituída por 4 camadas principais: (i) percepção, que consiste na coleta de dados em tempo real; (ii) dados; (iii) serviços, que consistem nos 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). A camada de percepção pode ser implementada através de RFID, wireless, mobile e sensores, *embedded object logic*, objeto *ad-hoc networking*, e infraestrutura de informação baseada na internet.

A arquitetura de ACV baseada em *blockchain* possui quatro camadas: infraestrutura, serviços, aplicativos e usuário. A camada de infraestrutura tem a função de coletar, transmitir e registrar dados. Os dados são armazenados em servidores locais e transmitidos pela rede em tempo real. A camada de serviços Blockchain realiza a limpeza, processamento e análise de dados. Ela é responsável por registrar e processar os dados relacionados à ACV, como dados de consumo de recursos de entrada e de emissão de resíduos de saída. Os dados de todo o ciclo de vida são registrados em blocos usados para criar Blockchains, como de energia e de emissão de gás. A camada de aplicações é responsável por visualizar os dados e auxiliar na tomada de decisões. O sistema ACV baseado em Blockchain oferece aos usuários quatro serviços principais: processamento de dados, análise de dados, rastreabilidade e gerenciamento de serviço Blockchain (ZHANG et al., 2020).

A *cyber-physical production system* (CPPS) *architecture* para ACV possui quatro elementos principais: (i) mundo físico, (ii) aquisição de dados, (iii) mundo cibernético e, (iv) suporte/controlado à decisão. O mundo físico inclui o equipamento de produção real (por exemplo, máquinas de processo, serviços técnicos de construção etc.) com suas configurações específicas e parâmetros de controle. Sensores instalados permitem a medição de vários parâmetros. Os dados capturados são transformados em conjuntos de dados apropriados e armazenados em um banco de dados, construindo a base para a criação do ICV. No mundo cibernético, os dados do ICV adquiridos anteriormente são avaliados por meio da AICV. Como resultado, os conjuntos de dados de ICV são traduzidos em impactos ambientais. Os resultados coletados são visualizados para suporte à decisão das partes interessadas envolvidas (HAGEN et al., 2020).

A *digital twin* (DT) *architecture* voltado a ACV consiste em três partes: ativo físico, contraparte virtual e dados. Os dados por sua vez são divididos em três fases: aquisição, armazenamento e análise. A camada de aquisição dos dados descreve o domínio da estrutura dedicada à integração de dados de IoT, DT ou banco de dados necessários para realizar avaliações. Os sensores IoT's fornecem dados brutos para serem agregados e os bancos de dados fornecem dados de impacto diretamente relacionados à especificação do processo considerado. O núcleo de elaboração e avaliação de dados calcula os impactos de sustentabilidade dos processos modelados reunindo todas as informações como indicadores, metodologias, fatores de caracterização e outros dados essenciais das camadas anteriores. A última seção do framework aborda a necessidade de indicações consistentes para direcionar a tomada de decisão de acordo com os dados calculados (BARNI et al., 2018).

Por fim, a arquitetura para *Open LCI Data Preparation* é composta pelas camadas: dispositivos, mensuração, plataforma IoT baseada em nuvem, contextualização, enriquecimento semântico. Durante o desenvolvimento de um conjunto de dados de ICV, é preciso monitorar diferentes fluxos associados ao processo da unidade, como entrada de material, consumo de energia e emissões para o ar, água e terra. Para monitorar cada fluxo, são necessários sensores diferentes. A plataforma em nuvem baseada em IoT foi projetada para armazenar e analisar diferentes dados coletados. A contextualização consiste no enriquecimento semântico dos dados analógicos gerados. Antes da curadoria de conteúdo, os dados são contextualizados com base na localização, hora e instalação de fabricação para a qual a energia é medida, para que

qualquer pessoa que consulte dados para uma determinada região/local ou instalação/equipamento de fabricação possa acessá-los com muita facilidade (JAYAPAL; KUMARAGURU, 2018).

### MODELO ESTRUTURAL

O modelo desenvolvido permite verificar os elementos essenciais dos sistemas IoT necessários para apoiar a ACV de edificações. As categorias da estrutura de referência de ACV mediada por IoT e suas relações estão demonstrados na Figura 4. A estrutura completa encontra-se no Apêndice A.

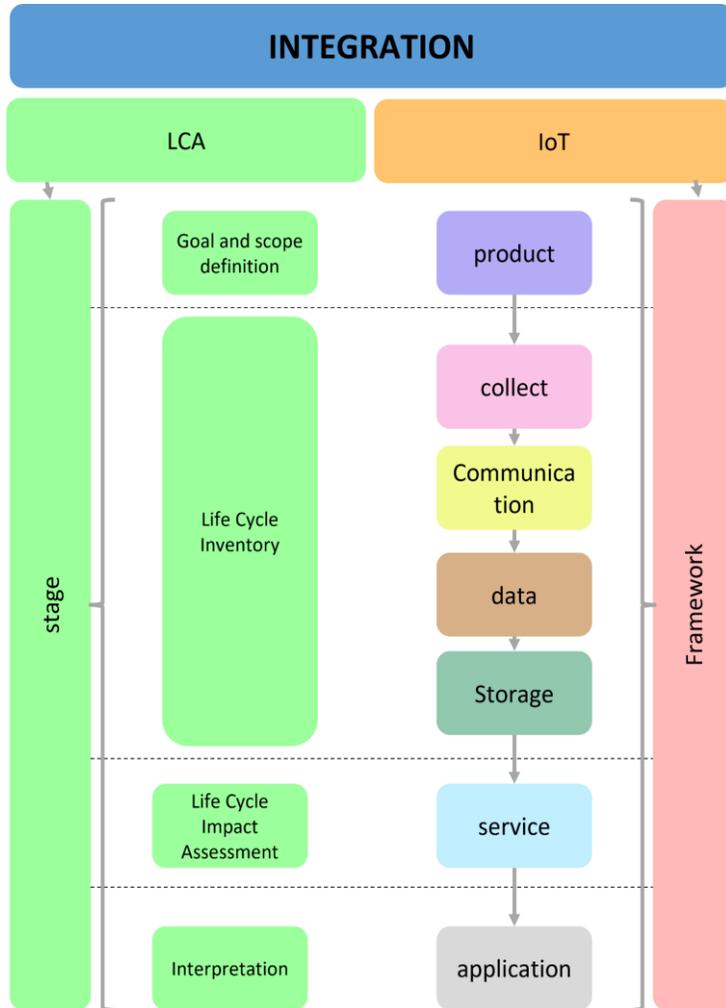


Figura 4. Estrutura de referência para integração de ACV e IoT

Fonte: as autoras.

Os estágios da ACV podem ser correlacionados ao fluxo de informação que ocorre nas camadas IoT:

O primeiro estágio é a definição do objetivo e escopo da ACV, que abrange a definição do produto, das fases do ciclo de vida e dos impactos ambientais a serem analisados. Este estágio está correlacionado à primeira camada da arquitetura IoT, onde estão inseridos os elementos físicos da edificação, ou seja, os produtos que serão analisados.;

O segundo estágio é o inventário do ciclo de vida, que abarca a coleta e armazenamento dos dados, formando assim uma base de dados. Este está correlacionado às camadas da IoT responsáveis pela coleta, comunicação e armazenamento em uma base de dados;

No estágio de Avaliação de Impacto do ciclo de vida, os dados são calculados e analisados de modo a obter os resultados das categorias da ACV. Este estágio está correlacionado à camada de serviços da IoT, abrangendo cálculo, análise e resultado;

Por fim, a interpretação dos resultados, consiste na análise e tomada de decisão do usuário. Esta está correlacionada à camada de aplicação da arquitetura IoT, que contém os usuários do sistema.

### ANÁLISE INTERPRETATIVA

O primeiro exercício de análise interpretativa consistiu numa avaliação interna, isto é, avaliar a capacidade explicativa do modelo estrutural para diferenciar os frameworks de IoT para ACV encontrados na RSL. Utilizamos a organização da tabela periódica dos elementos do ecossistema de IoT com ACV para verificar similaridades em relação aos elementos de cada camada IoT nos diferentes frameworks. A Figura 5 mostra o impacto de organização dos frameworks nas categorias de elementos IoT. De um modo geral, o fluxo de informação ocorre da seguinte forma: sensores são conectados aos produtos de modo a realizar a coleta de dados do ciclo de vida. Estes dados são transferidos através de uma rede de comunicação e armazenados em bases de dados. A partir destes dados, são realizados cálculos e análises ambientais, que são posteriormente visualizados pelos usuários. Os dados referentes ao ciclo de vida do produto, usuários, aplicação e impactos ambientais são gerenciados em todo o sistema. Observa-se que as arquiteturas SOA e Open LCI são mais estratificadas podendo-se traçar paralelos e coerências. Esta comparação e similaridade encontrada pode apontar para alternativas no momento da escolha de implementação de IoT para suporte à ACV. As arquiteturas de Blockchain, CCPS e Digital Twin são mais encapsuladas, congregando múltiplas funções em uma camada IoT, nestes casos as tecnologias e escopos podem diferir, sendo a escolha por estas arquiteturas excludentes.

System architecture framework	SOA architecture		Blockchain architecture	CCPS architecture	Digital Twin architecture	Open LCI Data Preparation
Authors	(TAO et al, 2014)	(ZUO, TAO e NEE, 2017)	(ZHANG et al, 2020)	(HAGEN et al, 2020)	(BARNI et al, 2018)	(JAYAPAL e KUMARAGURU, 2018)
Product	Activity layer	Physical layer	Infrastructure layer	Physical layer	Data acquisition layer	Sensing devices layer
Collect	Perception layer	IoT layer		Data acquisition layer		Measuring device layer
Communication	communication layer					
Data	Data layer	Cloud layer				Cloud based IoT platform layer
Storage						
Services	middle computational service layer	evaluation analysis service layer	Blockchain services layer	cyber world layer	assessment domain scoping layer	Contextualization layer
	service layer	basic system service layer			Data elaboration and assessment layer	semantic enrichment and linked data preparation layer
Application	application layer	users layer	application layer	users layer	decision support layer	sustainability oriented decision-making support layer

Figura 5. Elementos da categoria Framework

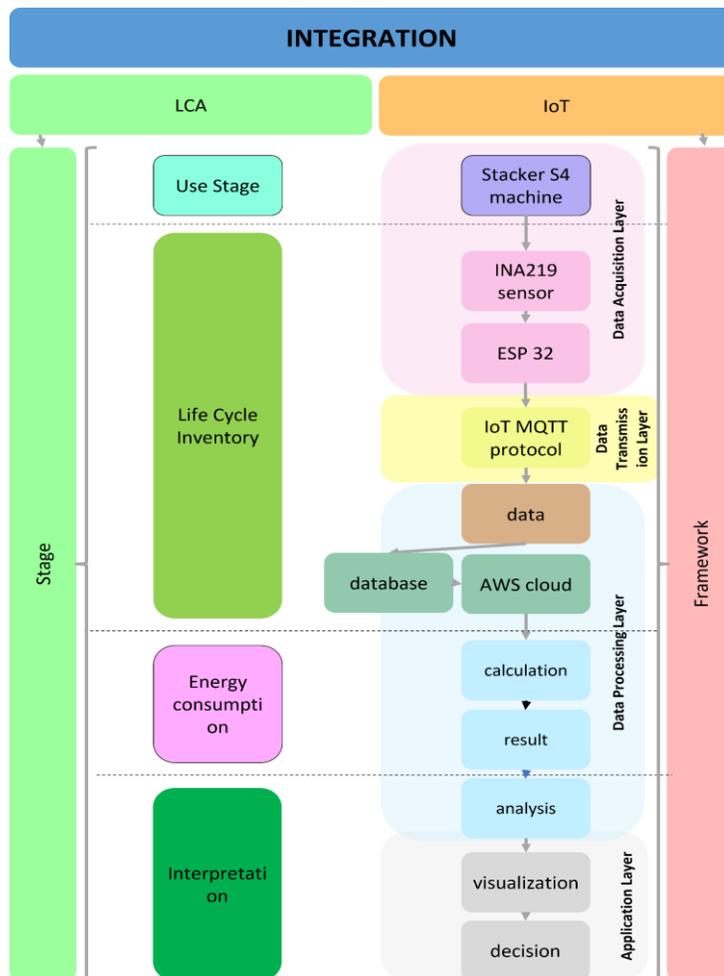
Fonte: as autoras.

O segundo exercício de análise interpretativa consistiu em aplicar a estrutura de referência para auxiliar na compreensão e comparação de soluções de IoT para ACV que não constaram do universo de observação da RSL que embasou o método estruturalista, sendo estes estudos

mais recentes e voltados para a modelagem 3D de componentes. Zakaria, Mativenga e Ariff (2023) implantaram um sistema IoT para monitorar o consumo de energia de impressoras 3D por deposição fundida (*Fused Deposition Modeling- FDM*). Kumar et al (2022) propuseram um framework de sistema de produção cyber-físico integrado à ACV para produtos impressos em 3D.

Zakaria, Mativenga e Ariff (2023) implantaram um sistema IoT para monitorar o consumo de energia de máquina de modelagem de deposição fundida. O sistema de IoT proposto consistem 4 camadas, sendo estas: (i) camada de aquisição dos dados, responsável pela coleta de dados da vida real; (ii) camada de transmissão de dados, responsável pela comunicação dos dados; (iii) camada de processamento dos dados, responsável pelo armazenamento, análise, processamento e gerenciamento e; (iv) camada de aplicação, que provê a interface do usuário (Zakaria; Mativenga; Ariff, 2023). Como as camadas de aquisição e coleta de dados estavam integradas pode-se considerar que a arquitetura de IoT adotada é uma SOA com configuração similar ao framework de Sou, Tao e Nee (2017) (segunda coluna da Figura 5).

A Figura 6 representa o framework para IoT de Zakaria, Mativenga e Ariff (2023) diagramado segundo o modelo estrutural de integração entre ACV e IoT, apesar dos autores não se referirem à ACV. As categorias apresentadas no modelo de referência (Figura 3) foram descritas respectivos elementos (Figura 4), conforme a pesquisa desenvolvida pelos autores. Cada elemento de IoT foi posicionado na respectiva camada da arquitetura IoT, conforme framework desenvolvido pelos autores. Os nomes das camadas IoT se mantiveram, entretanto observa-se uma reordenação das camadas.



**Figura 6.** Modelo Estrutural de integração entre ACV e IoT, com base no estudo de Zakaria, Mativenga e Ariff (2023)

Fonte: as autoras.

Kumar et al (2022) propuseram uma arquitetura de sistema de produção ciber física para ACV para estimar o impacto ambiental de produtos impressos em 3D com diferentes combinações de parâmetros de projeto e processo. O framework é composto por quatro camadas, sendo estas: (i) *physical world*, que abrange todas as máquinas, processos, sensores, energia, fluxos de materiais e etc; (ii) *data acquisition system*, reúne fatores de influência e variáveis do mundo físico e os armazena em bancos de dados apropriados; (iii) *cyber world*, realiza o processamento contínuo dos dados de entrada e; (iv) *feedback/control*, um painel que rastreia os dados da ACV. O modelo estrutural de integração entre ACV e IoT deste estudo é apresentado na Figura 7.

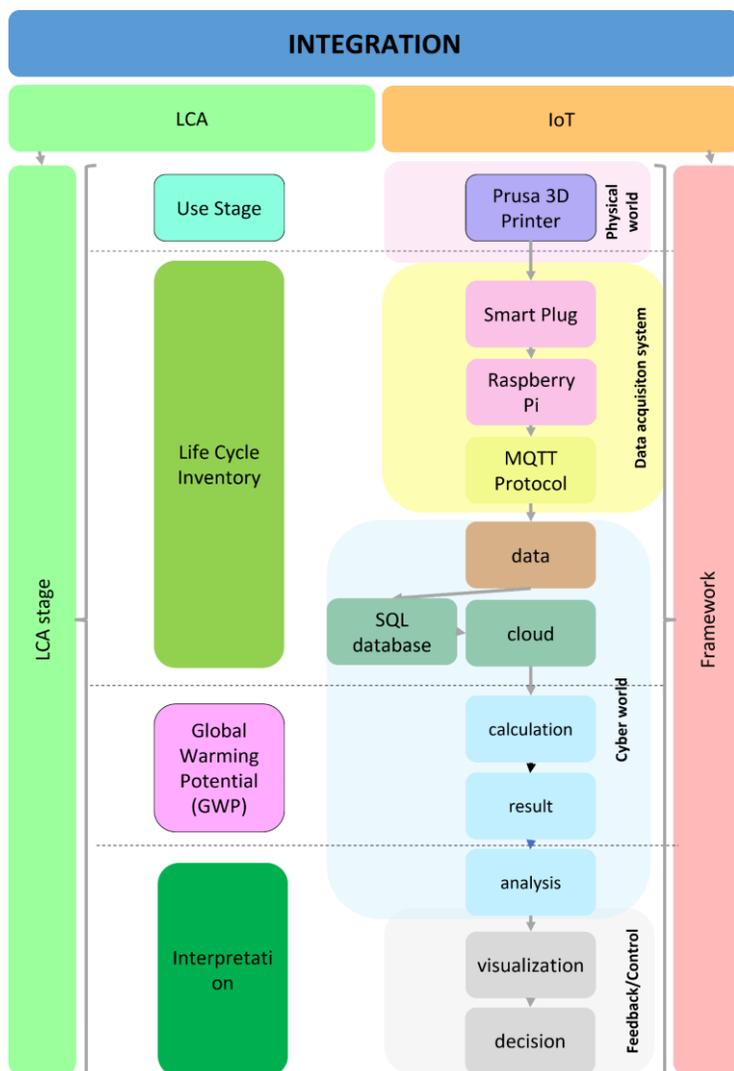


Figura 7. Modelo Estrutural de integração entre ACV e IoT, com base no estudo de Kumar et al (2022)

Fonte: as autoras.

A partir de uma análise visual das Figuras 7 e 8, é possível identificar os principais pontos de convergência e divergências entre as duas pesquisas. As pesquisas diferenciam-se quanto aos nomes e funções das camadas da arquitetura IoT utilizadas, o produto, os impactos ambientais analisados, os dispositivos e plataformas utilizadas. Os elementos relacionados às etapas da ACV e funções de cada camada IoT, foram comuns às duas pesquisas, como: *Life Cycle Inventory*, *Interpretation*, *collect*, *data*, *network device*, *calculation*, *result*, *analysis*, *visualization* e *decision*. Portanto, o modelo pode auxiliar na comparação, descrição e compreensão de trabalhos relacionados ao tema. A partir de uma análise geral dos artigos dentro do modelo estrutural, foi possível compreender de forma clara as principais diferenças entre os trabalhos.

## CONCLUSÃO

O modelo estrutural de Avaliação do Ciclo de Vida mediada por IoT foi desenvolvido através do método estruturalista tendo como base artigos científicos relacionados ao tema. O modelo evidenciou as partes constituintes críticas de um sistema de IoT voltado à ACV, sendo estas: produto, coleta, comunicação, dados, armazenamento, serviço e aplicação. O modelo evidenciou os elementos necessários para ACV, sendo estas: fases da ACV, produto, impactos ambientais e estágios do ciclo de vida.

Além disso, foi possível verificar a relação entre os elementos IoT e elementos da ACV. A fase de objetivo e escopo está relacionada ao produto. A ICV está relacionada às camadas de coleta, comunicação, dados e armazenamento. A AICV está relacionada à camada de serviços. E a fase de interpretação, está relacionada à camada de aplicação.

O modelo demonstrou ser capaz de discernir a escolha da arquitetura IoT para ACV. As arquiteturas SOA e Open LCI apresentaram similaridade entre si, de modo a apontar a possibilidade de combinações e alternativas no momento da escolha da arquitetura IoT utilizada no suporte à ACV. As arquiteturas de Blockchain, CCPS e Digital Twin, por sua vez, são mais encapsuladas, nestes casos a escolha por estas arquiteturas pode ser excludente, devido à diferença entre as tecnologias utilizadas e escopos.

O modelo estrutural pode ser utilizado por especialistas ACV e pessoas que desejam implementar IoT, proporcionando-lhes uma compreensão básica antes de mergulharem na seleção ou desenvolvimento de tecnologia. Ele também fornece uma estrutura inicial para arquitetos de sistemas para facilitar a incorporação das melhores práticas. Além disso, o modelo desenvolvido pode ser utilizado para comparação, descrição e compreensão de trabalhos relacionados ao tema.

Para permitir a implementação total do modelo conceitual, idealmente, todos os equipamentos e processos devem ser monitorados por meio de sensoriamento IoT, para formar um grande banco de dados com as informações necessárias para a ACV. As máquinas, equipamentos e produtos podem ser monitorados durante a etapa de produção, transporte, construção, operação e demolição da edificação. No futuro, este banco de dados poderá ser estabelecido em cooperação com institutos de certificação de sustentabilidade e ferramentas (HOLLBERG; GENOVA; HABERT, 2020). Além disso, políticas públicas deverão ser efetivadas para permitir o uso e compartilhamento de dados.

### ***Agradecimentos***

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88882.435512/2019-01

### ***Referências Bibliográficas***

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 28 out. 2010.

- BARNI, Andrea et al. Exploiting the Digital Twin in the Assessment and Optimization of Sustainability Performances. In: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS (IS), set. 2018, Funchal, Portugal. **Proceedings** [...] Funchal: IEEE, 2018. p. 706–713.
- COLLINGE, William O. et al. Dynamic Life Cycle Assessments of a Conventional Green Building and a Net Zero Energy Building: Exploration of Static, Dynamic, Attributional, and Consequential Electricity Grid Models. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 19, p. 11429–11438, 2018.
- \_\_\_\_\_. Enabling dynamic life cycle assessment of buildings with wireless sensor networks. In: PROCEEDINGS OF THE 2011 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE SYSTEMS AND TECHNOLOGY, maio 2011, Chicago, IL; United States. **Proceedings** [...] Chicago, IL; United States: IEEE, 2011. p. 1–6.
- DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JUNIOR, Jose Antonio Valle. **Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- ERL, Thomas. **Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design**. United States: Prentice Hall, 2005.
- EUROPEAN COMMISSION. **Internet of Things in 2020: Roadmap for the Future**. Luxembourg: Publications Office of the European Union., 2008.
- \_\_\_\_\_. **Vision and Challenges for Realising the Internet of Things**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- FLICK, Uwe. **Uma introdução à pesquisa qualitativa**. Tradução Sandra Netz. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- GARCIA-MUIÑA, Fernando E. et al. The Paradigms of Industry 4.0 and Circular Economy as Enabling Drivers for the Competitiveness of Businesses and Territories: The Case of an Italian Ceramic Tiles Manufacturing Company. **Social Sciences**, v. 7, n. 12, p. 1–31, 2018.
- GUINÉE, J.B. et al. **Handbook on life cycle assessment**. Operational guide to the ISO standards. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- HAGEN, Johanna et al. Live LCA in Learning Factories: Real Time Assessment of Product Life Cycles Environmental Impacts. In: Procedia Manufacturing, Learning Factories across the value chain – from innovation to service – The 10th Conference on Learning Factories, 2020, Austria. **Proceedings** [...] Austria: IALF, 2020. p. 128–133.
- HOLLBERG, Alexander; GENOVA, Gianluca; HABERT, Guillaume. Evaluation of BIM-Based LCA Results for Building Design. **Automation in Construction**, v. 109, p. 102972, 1 jan. 2020.
- JAYAPAL, Jayakrishnan; KUMARAGURU, Senthilkumaran. Real-Time Linked Open Data for Life Cycle Inventory. In: IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2018, Cham. **Proceedings** [...] Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 249–254.
- KOURA, Jessica et al. Comparative Cradle to Grave Environmental Life Cycle Assessment of Traditional and Extensive Vegetative Roofs: An Application for the Lebanese Context. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 3, p. 423–442, 1 mar. 2020.
- KUMAR, Rishi et al. Live Life Cycle Assessment Implementation using Cyber Physical Production System Framework for 3D Printed Products. In: Procedia CIRP, The 29th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 2022, Leuven, Belgium. **Proceedings** [...] Leuven, Belgium: CIRP, 2022. p. 284–289.

- LEVASSEUR, Annie et al. Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 8, p. 3169–3174, 2010.
- MAHALIK, N.P.; AU, T. LCDA from industrial systems using control network: A monitoring and assessment scheme for sustainability. **Environmental Progress**, v. 27, n. 1, p. 66–78, 2008.
- MASHHADI, Ardeshir Raihanian; BEHDAD, Sara. Ubiquitous Life Cycle Assessment (U-LCA): A Proposed Concept for Environmental and Social Impact Assessment of Industry 4.0. **Manufacturing Letters**, dez. 2017.
- MEDEIROS, Larissa Mendes; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 365–385, jun. 2018.
- NWODO, Martin N.; ANUMBA, Chimay J. A Review of Life Cycle Assessment of Buildings Using a Systematic Approach. **Building and Environment**, v. 162, p. 106290, 1 set. 2019.
- OZDEMIR, Vural; HEKIM, Nezh. 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**, v. 22, n. 1, 2018.
- REAP, John et al. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 2: impact assessment and interpretation. **Int J Life Cycle Assess**, n. 13, p. 374–388, 2008.
- RECUERO, Raquel. **Introdução à análise de redes sociais**. Salvador: EDUFBA, 2017.
- RICKENBACKER, Harold J. et al. Indoor Air Quality Assessments of Diverse Buildings in an Energy Conservation District from a Life Cycle Assessment Lens: Short Paper. BuildSys '16, 16 nov. 2016, New York, NY, USA. **Proceedings** [...] New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 16 nov. 2016. p. 207–210. doi: 10.1145/2993422.2993424.
- ROSS, Stephen A.; CHEAH, Lynette. Uncertainty Quantification in Life Cycle Assessments: Interindividual Variability and Sensitivity Analysis in LCA of Air-Conditioning Systems. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 5, p. 1103–1114, 2017.
- SHARMA, N.; PANWAR, D. Green IoT: Advancements and Sustainability with Environment by 2050. In: 2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends And Future Directions) (ICRITO), jun. 2020, Noida, India. **Proceedings** [...] Noida, India: IEEE, 2020. p. 1127–1132.
- SILVA, Juliano Libraga da; PASSUELLO, Ana Carolina B. Estrutura metodológica para avaliação de desempenho ambiental no processo de projeto de edifícios públicos. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 18, n. 1, p. 173–193, 27 ago. 2023.
- SU, Shu et al. Dynamic LCA Framework for Environmental Impact Assessment of Buildings. **Energy and Buildings**, v. 149, p. 310–320, 15 ago. 2017.
- TAO, Fei et al. Internet of things and BOM-Based life cycle assessment of energy-saving and emission-reduction of products. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 2, p. 1252–1261, maio 2014. doi: 10.1109/TII.2014.2306771.
- THIRY-CHERQUES, Hermano Roberto. **O Primeiro Estruturalismo**: Método de Pesquisa para as Ciências da Gestão. **RAC**, v. 10, n. 2, p. 137–156, 2006.
- TU, Mengru et al. 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), 2017, Nagoya, Japan. **Proceedings** [...] Nagoya: IEEE, 2017. pp. 249-254, doi: 10.1109/IEA.2017.7939216.

WANG, Z.; WANG, L. Green Building Materials Management Based on BIM Technology. In: International Conference on Construction and Real Estate Management, 2015, Lulea, Sweden. **Proceedings** [...] Lulea, Sweden: American Society of Civil Engineers, 2015. p. 170–177. doi: 10.1061/9780784479377.020.

WU, Weiwei et al. A Real-Time Recording Model of Key Indicators for Energy Consumption and Carbon Emissions of Sustainable Buildings. **Sensors**, v. 14, n. 5, p. 8465–8484, maio 2014.

ZAKARIA, Sakinah; MATIVENGA, Paul; ARIFF, E. A. R Engku. An Investigation of Energy Consumption in Fused Deposition Modelling using ESP32 IoT Monitoring System. In: Procedia CIRP, 30th CIRP Life Cycle Engineering Conference, 2023, New Brunswick, New Jersey. **Proceedings** [...] New Brunswick, New Jersey: CIRP, 2023 p. 263–268.

ZHANG, Abraham et al. Blockchain-Based Life Cycle Assessment: An Implementation Framework and System Architecture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 152, p. 104512, 1 jan. 2020.

ZUO, Ying; TAO, Fei; NEE, A. Y. C. An Internet of Things and Cloud-Based Approach for Energy Consumption Evaluation and Analysis for a Product. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 31, n. 4–5, p. 337–348, 2018.

**Natalia Barros**

*Autor principal*

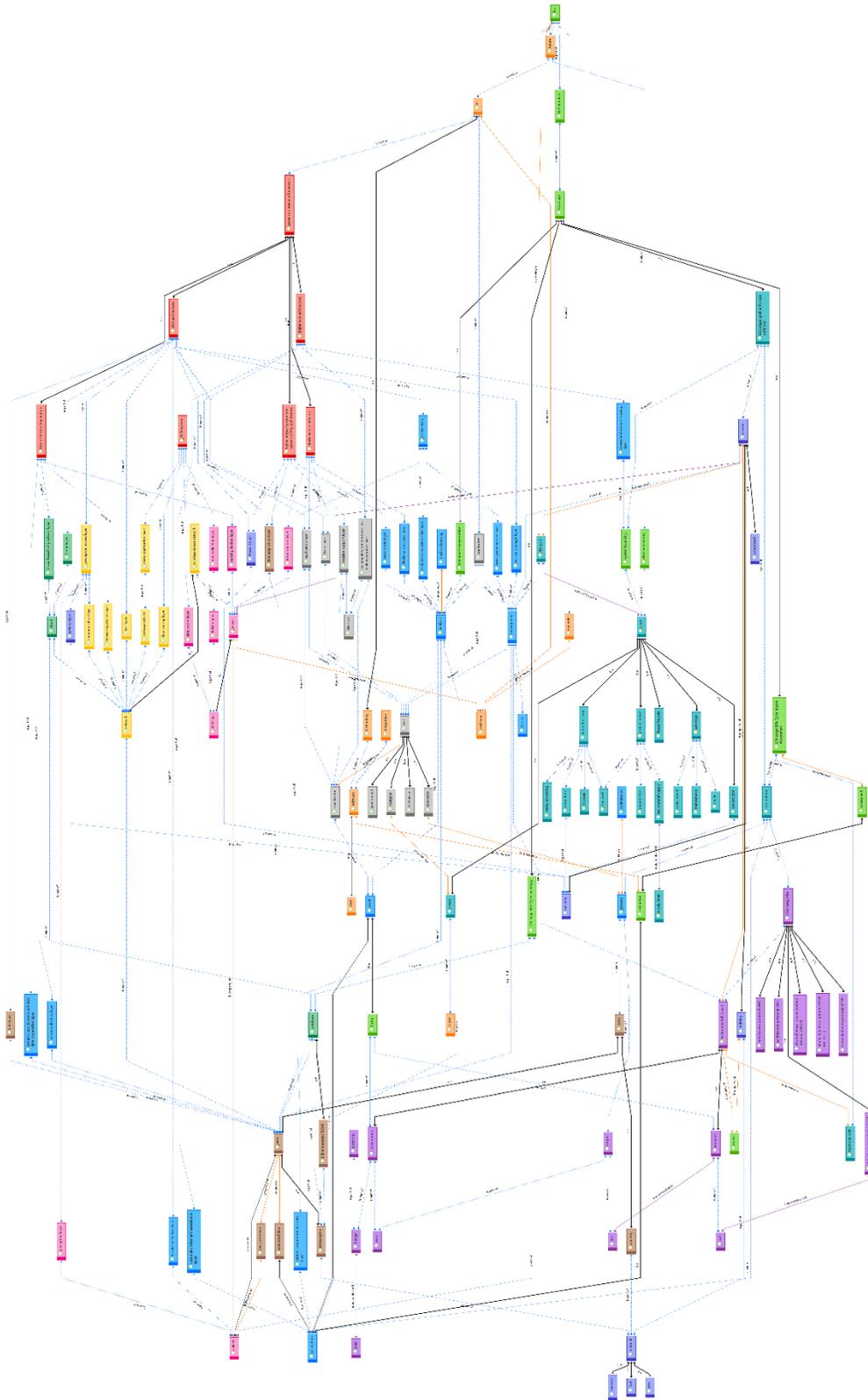
[natalianakamura.arq@gmail.com](mailto:natalianakamura.arq@gmail.com)

**Regina Ruschel**

*Supervisor e orientador*

[ruschel@unicamp.br](mailto:ruschel@unicamp.br)

## APÊNDICE A



**Figura 8.** Estrutura completa de referência para mediação da ACV pela IoT

**Fonte:** as autoras.