

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO & ORGANIZAÇÃO DO
CONHECIMENTO

CRISTIANO GERALDO TEIXEIRA SILVA

**ARCABOUÇO CONCEITUAL DE TECNOLOGIAS SEMÂNTICAS PARA
AUTOMAÇÃO DA CERTIFICAÇÃO LEED**

Belo Horizonte
2023

CRISTIANO GERALDO TEIXEIRA SILVA

**ARCABOUÇO CONCEITUAL DE TECNOLOGIAS SEMÂNTICAS PARA
AUTOMAÇÃO DA CERTIFICAÇÃO LEED**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão & Organização do Conhecimento, Escola de Ciência da Informação da Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do grau de Doutor, área de concentração Ciência da Informação.

Linha de Pesquisa: Gestão e Tecnologia

Orientador: Marcello Peixoto Bax

BELO HORIZONTE

2023

S586a

Silva, Cristiano Geraldo Teixeira.

Arcabouço conceitual de tecnologias semânticas para automação da certificação LEED [recurso eletrônico] / Cristiano Geraldo Teixeira Silva. - 2023.

1 recurso online (116 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Marcello Peixoto Bax.

Tese (doutorado)– Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Ciência da Informação.

Referências: f. 101-111.

Exigência do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Ciência da informação – Teses. 2. Construção civil – Aspectos ambientais – Teses. 3. Sustentabilidade – Teses. 4. Arquitetura da informação – Teses. 5. Ontologias (Recuperação da informação) - Teses. I. Bax, Marcello Peixoto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Ciência da Informação. III. Título.

CDU: 025.4.03



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO - ECI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO - PPGOC

FOLHA DE APROVAÇÃO

ARCABOUÇO CONCEITUAL DE TECNOLOGIAS SEMÂNTICAS PARA AUTOMAÇÃO DA CERTIFICAÇÃO LEED

CRISTIANO GERALDO TEIXEIRA SILVA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO, como requisito para obtenção do grau de Doutor em GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO, área de concentração CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO, linha de pesquisa Gestão e Tecnologia da Informação e Comunicação.

Aprovada em 10 de agosto de 2023, por videoconferência, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Marcello Peixoto Bax (Orientador)
ECI/UFMG

Prof(a). Renata Maria Abrantes Baracho Porto
Escola de Arquitetura/UFMG

Prof(a). Frederico Cesar Mafra Pereira
ECI/UFMG

Prof(a). José Eduardo Santarem Segundo
USP

Prof(a). Eduardo de Mattos Pinto Coelho
PBH - Secretaria Municipal de Finanças

Prof(a). Mário Lucio Pereira Junior
PUC-MG

Belo Horizonte, 10 de agosto de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Marcello Peixoto Bax, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2023, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Eduardo Santarem Segundo, Usuário Externo**, em 23/08/2023, às 19:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Cesar Mafra Pereira, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2023, às 21:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mário Lucio Pereira Junior, Usuário Externo**, em 28/08/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Maria Abrantes Baracho Porto, Professora do Magistério Superior**, em 01/09/2023, às 09:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Mattos Pinto Coelho, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 13:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2534028** e o código CRC **13A25A85**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO - ECI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO - PPGOC

ATA DA DEFESA DE TESE DO ALUNO

CRISTIANO GERALDO TEIXEIRA SILVA

Realizou-se, no dia 10 de agosto de 2023, às 14:00 horas, por videoconferência, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de tese, intitulada *ARCABOUÇO CONCEITUAL DE TECNOLOGIAS SEMÂNTICAS PARA AUTOMAÇÃO DA CERTIFICAÇÃO LEED*, apresentada por CRISTIANO GERALDO TEIXEIRA SILVA, número de registro 2019663818, graduado no curso de CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em GESTÃO E ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Marcello Peixoto Bax - ECI/UFMG (Orientador), Prof(a). Renata Maria Abrantes Baracho Porto - Escola de Arquitetura/UFMG, Prof(a). Frederico Cesar Mafra Pereira - ECI/UFMG, Prof(a). José Eduardo Santarem Segundo - USP, Prof(a). Eduardo de Mattos Pinto Coelho - PBH - Secretaria Municipal de Finanças, Prof(a). Mário Lucio Pereira Junior - PUC-MG.

A Comissão considerou a tese:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 10 de agosto de 2023.

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Marcello Peixoto Bax, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2023, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Eduardo Santarem Segundo, Usuário Externo**, em 23/08/2023, às 19:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Frederico Cesar Mafra Pereira, Professor do Magistério Superior**, em 23/08/2023, às 21:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mário Lucio Pereira Junior, Usuário Externo**, em 28/08/2023, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renata Maria Abrantes Baracho Porto, Professora do Magistério Superior**, em 01/09/2023, às 09:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Mattos Pinto Coelho, Usuário Externo**, em 01/09/2023, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2534024** e o código CRC **DB80632F**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que, em suas linhas tortas, me conduz no caminho certo. Aos meus pais, que sempre incentivaram meus estudos e, mesmos ausentes fisicamente, estarão sempre presentes em minhas lembranças.

À minha família, principalmente minha esposa Sabrina, pelo incentivo nos momentos de incertezas e ansiedade. Aos meus filhos, Valentina e Benício, que são minha motivação em buscar sempre o melhor de mim.

À UFMG por oferecer um ensino de qualidade e ao meu orientador Prof. Marcello Bax, pelo compromisso, profissionalismo e ensinamentos que me tornaram um pesquisador mais maduro.

A todos amigos e colegas que me apoiaram nesta caminhada através do compartilhamento de conhecimentos e da recarga emocional.

“Não tenha pressa, mas não perca tempo”
(José Saramago)

RESUMO

A avaliação de projetos construtivos sustentáveis objetiva mensurar o desempenho em sustentabilidade dos ambientes construídos e é importante para melhorar o meio ambiente em crescente deterioração. No entanto, a maioria das tarefas de avaliação ainda é realizada manualmente, consumindo tempo e aumentando o risco de erros. Na construção civil, tem-se a tecnologia BIM (*Building Information Modeling*), usada para simular um empreendimento em seu ciclo de vida. Diante do crescente uso desta tecnologia, surge a oportunidade de utilizar seus dados e relacionar a outros conjuntos de dados, para analisar diferentes aspectos do projeto. O emprego de tecnologias semânticas é uma alternativa para integrar dados e realizar inferências no processo de tomada de decisões. Em um fluxo de trabalho integrado, mediado por ontologias, o mapeamento entre os elementos da construção e outros dados pode auxiliar na análise de especialistas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um arcabouço conceitual, com o apoio em tecnologias semânticas, para estabelecer a relação entre os dados BIM e outros dados para automação da avaliação para certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*). O processo para a implementação do artefato aplica a *Design Science Research* e se inicia com a obtenção do arquivo no formato IFC (*Industry Foundation Classes*) de um projeto desenvolvido em BIM para o desenvolvimento de uma ontologia simplificada. A ontologia deste trabalho contempla os requisitos gerais da linguagem de modelagem conceitual OntoUML, fundamentada na ontologia UFO (*Unified Foundational Ontology*). A ontologia SEBIM busca modelar relações mais complexas contemplando classes para organizar os materiais e as zonas de um ambiente construído, bem como os critérios a serem pontuados. Para a integração com dados externos ao ambiente construído, dados abertos sobre o entorno e os meios de transporte são obtidos. Estes conjuntos de dados tabulares contêm coordenadas geométricas de áreas e pontos da cidade, seguindo padronização da OGC (*Open Geospatial Consortium*). Uma vez selecionados os conjuntos de dados relevantes para esta pesquisa, os dados são mapeados em ontologias e anotados semanticamente, seguindo a abordagem de Dicionário Semântico de Dados (SDD - *Semantic Data Dictionary*) para conversão em RDF (*Resource Description Framework*). O grafo RDF é gerado contendo a formalização dos dados e favorecendo a integração para consulta sobre locais da cidade por dados espaciais. Os conjuntos de dados são inseridos em um *triplestore* para realização inferências em SPARQL, geradas por meio da conversão dos critérios para avaliação da certificação em consultas e inserção das novas triplas inferidas no conjunto de dados. Uma consulta final é realizada para apresentar o resultado das inferências para promover novo conhecimento aos especialistas. O artefato desenvolvido é verificado com experimentações e validado conforme as questões de competências referentes aos critérios de certificação. Os resultados mostraram que a aplicação destas tecnologias promove a extensão semântica dos elementos construtivos em BIM, facilita a integração com outras bases de conhecimento e organiza conceitualmente os dados para melhor recuperar informações. As inferências desenvolvidas podem ser consideradas em outros estudos que buscam relacionar e integrar dados para descoberta de novas correlações e criação de novos conhecimentos em aplicativos baseados em dados.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Desempenho do Ambiente Construído, BIM, LEED, UFO, Ontologia, Inferência.

ABSTRACT

The evaluation of sustainable building projects aims to measure the sustainability performance of built environments and is important to improve the environment in increasing deterioration. However, most assessment tasks are still performed manually, consuming time and increasing the risk of errors. In civil construction, BIM (Building Information Modeling) technology is used to simulate a project in its life cycle. Faced with the increasing use of this technology, the opportunity arises to use your data and relate it to other data sets, to analyze different aspects of the project. The use of semantic technologies is an alternative to integrate data and make inferences in the decision-making process. In an integrated workflow, mediated by ontologies, mapping between building elements and other data can aid in expert analysis. This work presents the development of a conceptual framework, supported by semantic technologies, to establish the relationship between BIM data and other data for automating assessment for LEED certification (Leadership in Energy and Environmental Design). The process for implementing the artifact applies the Design Science Research and begins with obtaining the file in IFC format (Industry Foundation Classes) of a project developed in BIM for the development of a simplified ontology. The ontology of this work contemplates the general requirements of the conceptual modeling language OntoUML, based on the UFO ontology (Unified Foundational Ontology). The SEBIM ontology seeks to model more complex relationships, contemplating classes to organize the materials and zones of a built environment, as well as the criteria to be scored. For the integration with data external to the built environment, open data about the surroundings and means of transport are obtained. These tabular data sets contain geometric coordinates of areas and points in the city, following the OGC (Open Geospatial Consortium) standard. Once the relevant datasets for this research have been selected, the data are mapped into ontologies and semantically annotated, following the Semantic Data Dictionary (SDD) approach for conversion into RDF (Resource Description Framework). The RDF graph is generated containing the formalization of the data and favoring the integration for querying about city locations by spatial data. The datasets are inserted into a triplestore to perform inferences in SPARQL, generated by converting the criteria for evaluating the certification into queries and inserting the new inferred triples in the dataset. A final consultation is carried out to present the result of the inferences to promote new knowledge to the specialists. The artifact developed is verified with experiments and validated according to the competence questions referring to the certification criteria. The results showed that the application of these technologies promotes the semantic extension of the constructive elements in BIM, facilitates the integration with other knowledge bases and conceptually organizes the data to better retrieve information. The developed inferences can be considered in other studies that seek to relate and integrate data to discover new correlations and create new knowledge in data-based applications.

Keywords: Sustainability, Built Environment Performance, BIM, LEED, UFO, Ontology, Inference.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fragmento da tipologia dos Endurants.....	30
Figura 2 – Camadas conceituais do esquema IFC.....	32
Figura 3 – Categorias LEED	36
Figura 4 – Representação de uma tripla	49
Figura 5 – Inferência de simetria realizado no Protégé com o raciocinador Pellet.....	52
Figura 6 – Ciclo Regulador	58
Figura 7 – Processo de construção do artefato.....	65
Figura 8 – SEBIM: Esquema de dados	67
Figura 9 – Propriedades da ontologia simplificada.....	68
Figura 10 – Modelagem conceitual fundamentada.....	71
Figura 11 – Esquema para dados de ciclovias.....	73
Figura 12 – Dados armazenados conforme esquema.....	74
Figura 13 – Representações para os tipos de geometria	79
Figura 14 – Projeto BIM desenvolvido no Autodesk Revit.....	85
Figura 15 – Grafo do mapeamento em BIM	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das principais conversões.....	34
Tabela 2 – Critérios LEED para nova construção	37
Tabela 3 – Comparativo entre os sistemas de certificação	41
Tabela 4 – Correspondências entre SWRL e SPIN.....	56
Tabela 5 – Subproblemas e respectivos capítulos.....	63
Tabela 6 – <i>Namespaces</i> das ontologias utilizadas.....	73
Tabela 7 – Especificação dos dados explícitos.....	73
Tabela 8 – Especificação dos dados implícitos.....	74
Tabela 9 – Verificação de Competência	81
Tabela 10 – Instanciação da Ontologia.....	84
Tabela 11 – Especificação dos dados explícitos do projeto BIM.....	86
Tabela 12 – Especificação dos dados implícitos do projeto BIM.....	87
Tabela 13 – Pontuação dos critérios utilizados na experimentação	87
Tabela 14 – Solução para as dificuldades encontradas	88
Tabela 15 – Critérios implementados.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estrutura aninhada do problema	61
Quadro 2 – Grafo RDF gerado.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS

API	–	<i>Application Programming Interface</i>
AQUA	–	<i>Alta Qualidade Ambiental</i>
BIM	–	<i>Building Information Modeling</i>
CSV	–	<i>Comma-Separated Values</i>
DL	–	<i>Description Logic</i>
DM	–	<i>Dictionary Mapping</i>
DS	–	<i>Design Science</i>
DSR	–	<i>Design Science Research</i>
GML	–	<i>Geographic Markup Language</i>
HQE	–	<i>Haute Qualité Environnementale</i>
IFC	–	<i>Industry Foundation Classes</i>
LBDCG	–	<i>Linked Building Data Community Group</i>
LEED	–	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LDWG	–	<i>Linked Data Working Group</i>
OC	–	<i>Organização do Conhecimento</i>
OntoUML	–	<i>Ontological Unified Modeling Language</i>
OWL	–	<i>Ontology Web Language</i>
RDF	–	<i>Resource Description Framework</i>
RDFS	–	<i>Resource Description Framework Schema</i>
SDD	–	<i>Semantic Data Dictionary</i>
SOC	–	<i>Sistemas de Organização do Conhecimento</i>

SPIN	–	<i>SPARQL Inferencing Notation</i>
SWRL	–	<i>Semantic Web Rule Language</i>
TI	–	<i>Tecnologia da Informação</i>
UFO	–	<i>Unified Foundational Ontology</i>
UML	–	<i>Unified Modeling Language</i>
USGB	–	<i>United States Green Building Council</i>
URI	–	<i>Unified Resource Identifier</i>
URL	–	<i>Unified Resource Locator</i>
W3C	–	<i>World Wide Web Consortium</i>
WKT	–	<i>Well-Known-Text</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	14
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.4 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	18
1.5 CONTRIBUIÇÕES	19
1.6 ORGANIZAÇÃO GERAL DA TESE	20
2 ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO.....	21
2.1 SISTEMAS DE ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO	21
2.2 ANÁLISE DE DOMÍNIO.....	22
2.3 ONTOLOGIAS DE DOMÍNIO	24
2.4 ONTOLOGIAS DE FUNDAMENTAÇÃO	26
2.5 UFO – <i>UNIFIED FOUNDATIONAL ONTOLOGY</i>	27
3 ORGANIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES PARA CERTIFICAÇÃO	31
3.1 TECNOLOGIA BIM	31
3.2 SISTEMA LEED	35
3.3 SISTEMA AQUA	39
3.4 COMPARATIVO ENTRE OS SISTEMAS DE CERTIFICAÇÃO	40
3.5 TRABALHOS CORRELATOS	43
4 TECNOLOGIAS SEMÂNTICAS	46
4.1 REGRAS LÓGICAS	46
4.2 GRAFOS DE CONHECIMENTO.....	48
4.3 ANOTAÇÃO SEMÂNTICA DE DADOS.....	49
4.4 GERAÇÃO DE INFERÊNCIAS	51
4.4.1 Inferências em OWL.....	51

4.4.2 Inferências em RDF.....	53
5 METODOLOGIA	57
5.1 <i>DESIGN SCIENCE</i> COMO METODOLOGIA DE PESQUISA.....	57
5.2 METODOLOGIAS COMPLEMENTARES	59
5.3 ESTRUTURAÇÃO DESTA PESQUISA.....	61
6 INTEGRAÇÃO SEMÂNTICA PARA CERTIFICAÇÃO	65
6.1 ONTOLOGIA SIMPLIFICADA	66
6.2 ONTOLOGIA DE DOMÍNIO FUNDAMENTADA.....	69
6.3 ANOTAÇÃO DE DADOS TABULARES	72
6.4 INFERÊNCIAS PARA AVALIAÇÃO	75
7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
7.1 AVALIAÇÃO DA ONTOLOGIA.....	81
7.2 VALIDAÇÃO DO ARTEFATO	84
7.3 ADAPTAÇÃO EM SITUAÇÕES SIMILARES	94
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
8.1 CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS	96
8.2 GERAÇÃO DE NOVOS CONHECIMENTOS.....	98
8.3 TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Sustentabilidade corresponde à capacidade de produção da sociedade preservando os recursos naturais e garantindo a continuidade do sistema. A construção civil desempenha um papel importante, demandando um percentual crescente de energia e emitindo gases de efeito estufa. Na indústria da construção, esse tema significa a provisão de ambientes construídos, usando menores quantidades de materiais naturais, consumindo menos energia e produzindo menos poluição e resíduos. De acordo com (Elkington, 1998), a sustentabilidade abrange as dimensões ambiental, social e econômica. Para os ambientes construídos, a sustentabilidade ambiental se refere ao uso eficiente dos recursos naturais e impactos mínimos no meio ambiente, a sustentabilidade social se refere ao cultivo da coesão social ao fornecer um ambiente seguro e saudável e a sustentabilidade econômica se refere ao menor custo do ciclo de vida que permite uma estrutura capaz de atender funcionalmente aos requisitos dos usuários (Xiao et al., 2019).

O aumento nos custos iniciais, em torno de 2%, para apoiar um projeto sustentável resulta, em aproximadamente, 20% de economia nos custos totais no ciclo de vida de um ambiente construído. A preocupação com o uso de recursos e o meio ambiente levou ao conceito de construção verde, cada vez mais significativo na indústria da construção. A construção verde visa garantir qualidade e segurança durante todo o ciclo de vida da edificação e corresponde à aplicação da ideia de desenvolvimento sustentável (Xu et al., 2019).

Neste contexto, é possível classificar as construções sustentáveis como economicamente viáveis e perceber que têm recebido maior atenção. Tanto que países e organizações internacionais adotam sistemas de classificação para construção sustentável. De acordo com (Azhar et al., 2011), existem diferentes sistemas que são usados para classificar o desempenho ambiental das construções. Para obter um nível de classificação, a avaliação do projeto da construção é indispensável. Um sistema empregado em vários países é a certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), concebida e concedida pela USGBC (*United States Green Building Council*) que classifica as construções em quatro níveis (certificado, prata, ouro e platina) e é amplamente utilizada nas fases de projeto, construção, operação e manutenção de ambientes construídos (USGBC, 2020). Entretanto, como a sua metodologia de avaliação é manual, trabalhosa e propensa a erros, métodos mais inteligentes para certificar a sustentabilidade de construções são necessários (Jiang et al., 2018).

Destaca-se neste contexto, a modelagem de informações de construção (BIM – *Building Information Modeling*) que é uma tecnologia baseada em modelos digitais que proporciona maior produtividade e qualidade no processo de elaboração e planejamento de construção de um ambiente. Um modelo BIM pode integrar informações sobre projetos, compras, fabricação e construção, bem como práticas de operação e manutenção, definindo propriedades para os componentes do modelo ou integrando com um banco de dados externo. Devido à capacidade de acomodar dados multidisciplinares, o BIM é cada vez mais empregado em pesquisas sobre projetos de construções verdes (Sacks et al., 2018).

Porém, o esquema de dados da plataforma BIM apresenta limitação, pois não é capaz de integrar com eficiência as informações externas, provenientes de diferentes especialistas envolvidos nos projetos de arquitetura, engenharia, construção e gerenciamento de instalações. A representação destes dados é realizada conforme o esquema IFC (*Industry Foundation Classes*), que foi desenvolvido para facilitar e padronizar a interoperabilidade entre os aplicativos da indústria da construção. O fluxo de informações envolve a consulta do projeto em BIM, que corresponde a um modelo tridimensional, e a extração de dados, que são utilizados para produzir as informações que representam as visões do projeto. Quando as informações sobre projeto são armazenadas em formatos de arquivo heterogêneos, a integração das informações sobre um elemento de construção (parede, janela, materiais, entre outros) exige o acesso a diversos documentos. Este processo torna manual a extração e a combinação das informações necessárias (Pauwels et al., 2011).

As tecnologias da Web Semântica permitem que um especialista defina um dado sobre alguma entidade (elemento de construção), de modo que possa ser combinada com um dado fornecido por outras fontes. Portanto, uma representação semântica de um modelo de informação de construção permite que qualquer pessoa envolvida em um projeto de ambiente construído insira as suas informações sobre um elemento de forma que possa ser facilmente combinada com informações fornecidas por outras fontes (Niknam & Karshenas, 2017).

Em um fluxo de trabalho integrado, mediado por ontologias, o mapeamento entre os elementos da construção e outros conjuntos de dados podem auxiliar na análise de projetos. Ontologias representam um domínio de conhecimento, estabelecendo uma estrutura com regras e critérios que regulam a combinação entre conceitos e relações no domínio. Grupos de pesquisadores tem proposto ontologias que descrevem elementos de um ambiente construído como soluções para representar a semântica destes dados. A representação semântica da construção por ontologias pode permitir que os colaboradores de um projeto obtenham informações combinadas com outras fontes, enriquecendo as análises. Este método de representação é potencialmente vantajoso para auxiliar a certificação por permitir

integrações, consultas e inferências usando a ontologia relacionada ao formato IFC e outras ontologias integradas (Rasmussen et al., 2019).

Uma ontologia de domínio é um modelo conceitual para representar uma determinada porção da realidade conforme uma conceituação compartilhada. Para desenvolver uma ontologia de qualidade é preciso satisfazer os requisitos gerais de uma linguagem de modelagem conceitual, ou seja, deve ter como teoria subjacente uma ontologia de fundamentação (Guizzardi et al., 2011).

Esse trabalho pretende contribuir para o avanço do uso de tecnologias para apoiar especialistas na elaboração de projetos sustentáveis. Essa temática oferece oportunidades acadêmicas, comerciais e sociais uma vez que novos estudos favorecem a criação de *softwares* comercializáveis para ajudar na criação de ambientes em consonância com o meio ambiente. A integração semântica de dados presente neste contexto, buscar solucionar ou mitigar problemas na pesquisa manual de informações ao reestruturar os dados em um formato acessível, anotado por metadados e legível por máquina. Esta formalização visa proporcionar a automação para a certificação LEED.

1.2 Problema de pesquisa

Embora existam diretrizes e métricas para construções sustentáveis, o projeto de ambientes construídos sustentáveis não é um processo simples. A prática corrente em um projeto de construção tradicional é um método sequencial realizado por meio de diferentes disciplinas na tomada de decisão, e nenhum modelo integrado é usado para estudar diferentes aspectos da sustentabilidade de forma sistemática. A natureza multidisciplinar da sustentabilidade da construção requer a consideração das interdependências entre todas as questões de arquitetura, engenharia, construção e operação, levando a um novo nível de complexidade na busca de melhores soluções (D. Zhang et al., 2019).

Os projetistas gastam tempo e esforço em várias etapas envolvendo a seleção de materiais, avaliação dos espaços, simulações de iluminação e consumo energético, bem como organizando a documentação comprobatória para certificação. A implementação da construção verde em escala integrada e abrangente para satisfazer a perspectiva holística e a colaboração apresenta muitos desafios. É preciso desenvolver soluções robustas para enfrentar a complexidade da gestão da construção verde e dos tratamentos ambientais necessários (Hong et al., 2019).

A integração do processo de avaliação da construção verde com a tecnologia BIM é um avanço na busca por melhores soluções. O desafio que esta incorporação enfrenta é a expressão parametrizada do conhecimento de avaliação e a síntese de informações

relacionadas ao BIM de todos os elementos disponíveis com o objetivo de alcançar medições otimizadas. Nos últimos anos, a síntese de informações tornou-se mais complexa com o aumento do uso de mineração de dados e apoio à tomada de decisão (Xu et al., 2019). Na maioria das vezes, os dados de construção são fragmentados e distribuídos em diferentes fontes, o que não é conveniente para a coleta e representação de informações (Jiang et al., 2018).

Assim, para promover melhor integração das diferentes fontes de dados e oferecer uma solução que satisfaça a otimização da avaliação de um ambiente construído, a questão central desta pesquisa é: como tecnologias semânticas podem ser empregadas para automatizar o processo de avaliação tradicional da certificação LEED?

1.3 Objetivos

Para responder à questão de pesquisa, tem-se como objetivo geral o desenvolvimento de um arcabouço conceitual, com o apoio em tecnologias semânticas, para estabelecer a relação entre os dados BIM e dados tabulares para automação da avaliação para certificação LEED. Esta solução ainda prevê a realização de consultas e inferências para gerar novo conhecimento sobre o atendimento aos critérios da certificação.

Por esta questão de pesquisa ser um problema de cunho prático, e o objetivo geral ser a construção de um arcabouço, foi adotada a metodologia de pesquisa *Design Science*. A utilização dessa metodologia viabilizou a resolução deste problema prático, bem como a geração de novos conhecimentos teóricos, requisito fundamental em uma tese.

Portanto, para se atingir esse objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Aprofundar o entendimento do problema por meio de levantamento do referencial teórico relacionado à certificação LEED, tecnologia BIM, anotação semântica de dados abertos e ao emprego de inferências em grafos de conhecimento;
- Propor um modelo de aplicação ontológica bem fundamentada para integração semântica para realização de inferências, conforme os critérios para certificação LEED;
- Desenvolver experimentos para verificação e validação do modelo desenvolvido;
- Verificar a possibilidade de generalizar a solução do problema no âmbito da construção civil e organização de informações, com o apontamento das contribuições teóricas e práticas do trabalho.

1.4 Justificativa e relevância

O tema desta pesquisa está em consonância com as temáticas da linha de pesquisa de Gestão e Tecnologia. Uma abordagem científica do tema contribui para a geração de novos conhecimentos neste campo, que é um dos pilares da Ciência da Informação.

A representação semântica de um projeto de construção permite que os usuários envolvidos obtenham dados sobre elementos de construção que podem ser combinados com outros conjuntos de dados, como o entorno do ambiente construído. A integração de várias fontes (por meio de ontologias) de dados melhora a tomada de decisões, conforme os critérios estabelecidos para pontuação e classificação do nível de certificação. A aplicação de inferências para atendimento destes critérios apresenta novas possibilidades para aplicação dos dados BIM, integrados a dados abertos.

A organização do conhecimento aplicada neste domínio requer a organização de documentos e informações com o suporte de sistemas de informação. Conforme (Hjørland, 2017), apoiar em ontologias favorece o desenvolvimento de sistemas de organização de conhecimento e reforça a integração da Ciência da Computação com a Ciência da Informação. Trabalhos neste aspecto aplicam o conhecimento de métodos e resultados de estudos analíticos de domínio sobre cognição profissional, representação do conhecimento em ciência da computação e inteligência artificial.

O desenvolvimento de ontologias envolve atividades focadas na criação de um artefato de representação do conhecimento, adequado à compreensão de computadores e humana. Dentre estas atividades destaca-se o uso de ontologias de alto nível como base para as ontologias de domínio. As ontologias de alto nível são artefatos de representação que descrevem conceitos gerais comuns em todos os domínios, promovem a interoperabilidade de ontologias e, conseqüentemente, contribui para a construção de ontologias de domínio (Farinelli & Souza, 2021).

Conjuntos de dados em formatos tabulares podem ser usados para integração com uma ontologia de dados BIM. Para isso, é necessário realizar a conversão do formato por tecnologias da Web Semântica. Geralmente, estes conjuntos são acompanhados de um dicionário de dados que formaliza a descrição sobre os dados. Abordagens para o mapeamento e a representação semântica destes dados promovem descoberta, interoperabilidade, reutilização e rastreabilidade. A formalização dos dados tabulares em grafos de conhecimento, também chamados de grafos RDF (*Resource Description Framework*), é realizada na conversão da sua estrutura em uma ontologia (Rashid et al., 2020).

Vários padrões do W3C, incluindo RDF e OWL (*Ontology Web Language*), fornecem interpretações semânticas para grafos RDF que permitem inferir instruções RDF

adicionais a partir de afirmações explicitamente dadas. Muitos aplicativos que dependem dessas semânticas requerem uma linguagem de consulta como SPARQL, que é uma linguagem bem estabelecida com semântica precisamente entendida e capaz de combinar grafos RDF arbitrários e retornar atributos e transformações dos mesmos. Assim, um conjunto de triplas retornadas em uma consulta SPARQL também pode ser considerado como triplas inferidas em um processo de raciocínio (Coppens et al., 2013).

Pesquisas atuais não se basearam em uma ontologia de fundamentação, não abordam a integração com dados abertos e nem a aplicação de inferências para análises quantitativas, pontos-chave deste projeto. Nossa proposta busca modelar relações mais complexas para a análise de certificação LEED. Apesar de existirem outros sistemas de certificação que podem ser aplicadas conforme o projeto e o modelo de negócio da empresa, a escolha do sistema LEED é apoiada pelo seu método de pontuação e seu reconhecimento internacional. Isto é, não é necessário atender a todos os requisitos para se obter pontuação suficiente, um critério pode ser bem pontuado e outro não, mas a média é a que conta como pontuação.

1.5 Contribuições

Este trabalho contribui especificamente com os estudos sobre abordagens na interoperabilidade de ontologias com a anotação semântica de dados abertos tabulares para geração de grafos de conhecimento. Além disso, apresenta meios para geração de novos conhecimentos com a aplicação de inferências, como apoio a avaliações em projetos de ambientes construídos.

A utilização da metodologia *Design Science* contribui para o campo da Ciência da Informação, por ser uma alternativa viável para a subárea de Gestão e Tecnologia, cujos trabalhos envolvem a concepção de artefatos (arcabouço conceitual), mas não deixam de gerar novos conhecimentos.

A aplicação de padrões OntoUML (*Ontological Unified Modeling Language*) para construir a ontologia, conciliada à utilização da metodologia SABio, que oferece um modelo para criação de ontologias de domínio bem fundamentadas.

O problema prático envolvendo a utilização de ferramentas de representação semântica contribui no contexto tecnológico. O protótipo desenvolvido proporciona uma base para outras soluções de avaliações de projetos de ambientes construídos.

O escopo da pesquisa é limitado a apenas novos projetos de construção, uma vez que o manual para certificação LEED contém também critérios específicos para outros tipos de construções como unidades de saúde, armazéns, escolas, hospedagem e lojas de varejo.

1.6 Organização geral da tese

Além deste capítulo de introdução, que apresentou a questão de pesquisa, os objetivos e as contribuições esperadas, esta tese é composta de outros 7 capítulos. O Capítulo 2 contém os aspectos gerais sobre a organização do conhecimento apoiada em ontologias. No Capítulo 3 realiza-se a caracterização e delimitação do problema, proporcionando um melhor entendimento do contexto e das dificuldades para organização das informações para certificação LEED, com uma breve comparação com outros sistemas de certificação, bem como apresenta trabalhos correlatos que buscam soluções para automatizar o processo de avaliação.

No Capítulo 4 é apresentado o referencial teórico sobre as tecnologias semânticas adotadas no trabalho. Esse levantamento foi realizado através de buscas no Portal CAPES em 2021, considerando as bases de dados Scielo, Scopus, Web of Science e Google Scholar, com os termos relacionados a esta tese (“Ontology” and “BIM” and “LEED” or “Ontology” and “SWRL” and “BIM” and “LEED” or “Ontology” and “Inference” and “BIM” and “LEED” or “Ontology” and “SPARQL” and “BIM” and “LEED”). O resultado elencou um conjunto de tecnologias existentes que podem ser úteis na solução do problema da pesquisa.

No Capítulo 5 é descrita a metodologia empregada na pesquisa, destacando o problema principal estruturado em questões teóricas e práticas. A elaboração do artefato para integração e inferências para certificação é apresentada no Capítulo 6. No Capítulo 7 inclui-se a análise, verificação, validação e síntese dos resultados obtidos em experimentos e demonstrações.

No Capítulo 8 são abordadas as considerações finais, evidenciando o cumprimento dos objetivos, as contribuições para novos conhecimentos e as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas na pesquisa.

2 ORGANIZAÇÃO DO CONHECIMENTO

Este capítulo apresenta conceitos e paradigmas para discutir a Organização do Conhecimento (OC) e a Análise de Domínio, com enfoque ao desenvolvimento de ontologias.

A Organização do Conhecimento está ligada à modelagem de domínios do conhecimento, buscando um núcleo comum de conceitos. Tendo em vista a centralidade do OC em relação à Ciência da Informação, Hjørland (2008) aponta que, em parte, essa visão central se deve ao fato da OC ser de natureza interdisciplinar. Para essa abordagem, Hjørland (2008) considera dois sentidos para o conceito de organização da informação: um amplo, que se preocupa em responder como o conhecimento é construído, do ponto de vista da divisão social do trabalho intelectual e da organização social do conhecimento; e um rigoroso, dedicado à criação e manutenção de Sistemas de Organização do Conhecimento (SOC) para intermediar o conhecimento registrado (vinculado à Ciência da Informação), preocupado com a descrição de conceitos.

2.1 Sistemas de Organização do Conhecimento

A OC corresponde aos processos de organização do conhecimento, como indexação, marcação, classificação, descrição e organização de documentos e informações. Já os SOC abrangem sistemas de classificação, tesouros e ontologias. Embora OC tenha um aspecto teórico, o objetivo tanto das atividades práticas como da investigação empírica e teórica é o apoio às atividades práticas. Os objetivos práticos são a única justificativa para a OC. Desenvolvimentos em Tecnologia da Informação (TI), como bancos de dados, redes de comunicação e mídias sociais também podem ser considerados como raízes para a OC. O SOC desenvolvido para organizar documentos e informações trata, principalmente, de conceitos de organização. As estruturas conceituais usadas no SOC são, em grande parte, derivadas de domínios específicos do conhecimento (Hjørland, 2021).

Para Dahlberg (2006), a organização do conhecimento é a ciência que ordena a estruturação e sistematização dos conceitos, de acordo com suas características, que podem ser definidas como elementos de herança do objeto, e a aplicação dos conceitos e classes dos conceitos ordenados pela indicação de valores, dos referentes conteúdos de objetos ou assuntos. A partir dessa organização do conhecimento criam-se ferramentas que apresentam a interpretação organizada e estruturada do objeto, chamados de SOC. No contexto da Ciência da Informação, os SOC ou esquemas de representação do conhecimento são instrumentos que fazem a tradução dos conteúdos dos documentos originais e completos, para um esquema estruturado sistematicamente, que representa esse conteúdo, com a

finalidade principal de organizar a informação e o conhecimento e, conseqüentemente, facilitar a recuperação das informações contidas nos documentos. A infraestrutura que dá suporte ao desenvolvimento dos SOC requer, antes de tudo, uma análise das necessidades dos usuários dos sistemas, a identificação do tipo de SOC apropriado e o desenvolvimento do *hardware* e do *software* adequado à arquitetura de rede, sua integração e manutenção (Dahlberg, 2006).

Hjørland (2017) afirma que as ontologias promovem o desenvolvimento de SOC, alavancando métodos de análise de domínio que levam a técnicas de representação do conhecimento em Ciência da Computação e, em última análise, reforçam a integração disciplinar da Ciência da Informação. O autor sugere que a abordagem analítica de domínio para classificação e OC pode ser resumida da seguinte forma:

- Escolha de um determinado domínio,
- Entendimento da classificação deste domínio de acordo com o conhecimento contemporâneo (incluindo diferentes visões),
- Discussão da base, dos pressupostos epistemológicos e de quais interesses são atendidos pelas classificações propostas,
- Sugestão de uma classificação motivada.

Os SOCs são ferramentas semânticas com vocabulários estruturados e formalizados, usadas para o tratamento e a recuperação da informação. A pesquisa em ontologias como SOC é hoje o campo, no qual especialistas e filósofos estão trabalhando em conjunto com cientistas da computação e da informação (Hjørland, 2017).

OC é um subdomínio chave da Ciência da Informação, que se dedica à ordem conceitual do conhecimento (Smiraglia, 2015). Uma abordagem pragmática do OC, vista como uma lógica predominante por (Hjørland, 2002), concentra-se na recuperação da informação. Assim, considerando a análise de domínio derivada da visão pragmática do OC, faz-se necessário elucidar os principais conceitos desta área do conhecimento e suas principais abordagens, que são importantes para o desenvolvimento desta tese.

2.2 Análise de Domínio

A análise de domínio é uma proposta desenvolvida por (Hjørland; Albrechtsen, 1995), sendo conceitualmente aprofundada por outros estudos ao longo dos anos subsequentes (Hjørland, 2017). Smiraglia (2015) afirma que o paradigma OC engloba a análise de domínio como forma de visualizar a emergência e coerência de um domínio e como forma de dominar os parâmetros do universo em que esse domínio opera.

O método pragmático de análise de domínio, sugerido por Hjørland (2002) baseia-se na determinação de objetivos e usos do conhecimento gerado. A utilização da análise de

domínio está ligada aos aspectos sócio cognitivos das relações entre a sociedade e o conhecimento por ela produzido. A análise de domínio explora relações ontológicas, ou seja, relações genéricas em tesouros e sistemas de classificação; estuda grupos sociais como cientistas, profissionais ou estudantes; e estuda epistemologias, paradigmas, tradições, teorias, o que é importante porque as pessoas tendem a se organizar de acordo com seus pontos de vista (Hjørland, 2004).

Smiraglia (2015) traz uma visão semelhante da análise de domínio, caracterizada pelo estudo dos aspectos teóricos de um determinado ambiente, constituindo um meio para a geração de conhecimento. Segundo ele, a análise de domínio permite observar a evolução do conhecimento, o compartilhamento de informações de diferentes domínios e a migração de paradigmas de um mesmo domínio.

Para Hjørland e Albrechtsen (1995), o objeto da análise de domínio é o desenvolvimento de estruturas coletivas de informação e conhecimento. Para os autores, cada domínio tem suas particularidades, seus discursos ideológicos e por isso não podem ser tratados como semelhantes. Ou seja, cada domínio merece ser tratado de forma específica, pois possui diferentes formas de interpretação, dependendo do objeto de estudo. OC, estrutura de informação, pesquisa e critérios de relevância estão inter-relacionados com o trabalho de comunidades específicas. A questão central, segundo Hjørland (2002), é como avaliar os domínios de conhecimento dos especialistas da área.

Para a abordagem metodológica de análise de domínio, predomina o uso das onze abordagens de Hjørland (2002), pois abrange desde a formação epistemológica de um domínio até estudos métricos para sua análise. Para o autor, as abordagens de análise de domínio não devem ser utilizadas separadamente e devem ser combinadas, pelo menos em duas, para caracterizar e definir um domínio. Assim, o desenvolvimento do protótipo apresentado nesta tese envolve as abordagens de “construir classificações e tesouros especiais” e “implementar a indexação e recuperação especializada da informação, através das tecnologias de informação e comunicação”.

O domínio do conhecimento da indústria da construção civil, utilizado para o desenvolvimento do artefato desta tese, foi orientado pelo entendimento da tecnologia BIM e pela organização das informações para processos como a obtenção de uma certificação de sustentabilidade. O Capítulo 3 apresenta os resultados das comunidades deste domínio que trabalham na padronização de termos e seus relacionamentos para o desenvolvimento de um SOC.

2.3 Ontologias de Domínio

A definição de ontologia no campo da ciência e tecnologia deriva seu significado da filosofia clássica. No sentido clássico da palavra, ontologia simplesmente significa uma explicação sistemática da existência (Gomez-Perez et al., 2017). Smith (2004) descreve a ontologia como um ramo da filosofia para definir os tipos e estruturas de objetos, propriedades, eventos, processos e relações em todas as áreas da realidade. O autor cita que, "Ontologia" é frequentemente usada pelos filósofos como sinônimo de "metafísica". Assim, "ontologia" é utilizada em um sentido mais amplo, para se referir ao estudo do que pode existir e, "metafísica" para o estudo de qual, das várias alternativas de ontologias possíveis, é de fato verdadeira para a realidade (Smith, 2004).

As ciências da informação mudaram a ontologia do abstrato para o mais concreto. De acordo com (Gruber, 1993), uma ontologia é uma especificação formal explícita de uma conceitualização compartilhada. As ontologias permitem um melhor entendimento do mundo para facilitar a comunicação entre as pessoas, utilizando informações comuns de um domínio de conhecimento. Adota-se aqui esta definição como o conceito básico para ontologias apoiadas ao uso da tecnologia BIM, pois, ontologias organizam a estrutura do conhecimento de um domínio tornando-o reutilizável (Noy & McGuinness, 2001).

Segundo Arp, Smith e Spear (2015), uma ontologia pode ser classificada como um artefato, uma vez que é algo que foi deliberadamente elaborado por seres humanos para atingir certos propósitos. Embora nem todos os artefatos representacionais sejam ontologias, todas as ontologias são artefatos representacionais e, portanto, tudo o que é válido para artefatos representacionais, em geral, também é válido para ontologia (Arp et al., 2015).

Uma ontologia de domínio é definida conforme as dimensões semântica e pragmática. O aspecto semântico corresponde ao significado representado na ontologia, envolvendo a identificação das entidades e suas relações formalizadas. O pragmático contempla as questões práticas do uso de ontologias, considerando o conhecimento de domínio, critérios de raciocínio e métodos de projeto (Keet, 2018).

De acordo com Noy e McGuinness (2001), as cinco razões principais para alguém desenvolver uma ontologia são:

1. criar um entendimento comum de informações entre as pessoas;
2. permitir a reutilização do conhecimento do domínio;
3. tornar explícitas as principais premissas de um domínio;
4. separar o conhecimento de domínio do conhecimento de operação;
5. analisar o conhecimento do domínio.

Uma ontologia desenvolvida de maneira adequada consiste na inclusão de termos, definições, tipos de atributos, classes e hierarquia de classes. Dentro de uma ontologia, cada termo deve ter uma definição e descrição concisas, conforme o contexto e compreensão compartilhada. O atributo é definido como uma propriedade ou característica que pode ser utilizado para descrever uma classe. Por sua vez, a classe corresponde a uma abstração de um conjunto de instâncias com atributos semelhantes. Tais classes devem ser organizadas de acordo com a sua importância relativa ou abrangência, definindo uma hierarquia para relacionamento entre as classes (Gruber, 1993; Noy & McGuinness, 2001).

Muitos itens podem dificultar o desenvolvimento de ontologias. No entanto, existem métodos para superar esses desafios. Segundo Noy e McGuinness (2001), alguns dos desafios no desenvolvimento de ontologias incluem:

- Perguntas de competência: Apesar de ser possível criar uma ontologia sem questões de competência, a criação de um conjunto útil de perguntas de competência antes da criação de uma ontologia inicial é um desafio;
- Polarização de termos: Cada termo tem um significado diferente para pessoas diferentes. Para resolver esta questão, deve-se criar novos termos durante o processo de criação de uma ontologia que se concentre no significado central. Nesse estágio de desenvolvimento ontológico, os termos podem ser arbitrários, desde que tenham uma definição acordada. Depois que uma ontologia é criada, pode ser possível empregar termos mais estabelecidos;
- Ciclicidade de classe: O ciclo de classes, em que uma subclasse faz parte de uma superclasse e vice-versa, também é possível. É necessário a dedicação ao criar e avaliar classes e hierarquia de classes para garantir que as mesmas sejam estruturadas adequadamente;
- Herança múltipla: As classes devem ser desenvolvidas considerando as possibilidades de uma herança múltipla modelada em sua estrutura. Esse desafio depende do domínio;
- Introdução à nova classe: Uma classe adicional deve ser criada quando a instância dentro da classe tem propriedades adicionais ou restrições diferentes ou relacionamentos diferentes das superclasses. Para que uma ontologia seja útil, é necessário equilíbrio entre não ter classes suficientes e ter muitas classes;
- Números de subclasse: Não há um número definido de subclasses para uma superclasse. Caso uma classe tenha apenas uma subclasse, essa pode ser incompleta ou modelada incorretamente. Já uma classe que tenha mais de uma dúzia de subclasses, pode haver uma classe adicional entre a subclasse e a superclasse;

- Classes versus instâncias: É importante determinar se um termo é uma nova classe, valor de propriedade ou instância. O desafio é se um atributo ou uma propriedade com valores semelhantes deve ser criado em uma nova classe. Além disso, pode ser possível que uma instância seja uma classe;
- Limitar o escopo: Uma ontologia não pode conter todas as informações, incluindo atributos e propriedades, sobre o domínio. O escopo deve ser definido durante o primeiro estágio. Não é possível documentar todas as informações sobre um domínio específico, no entanto, uma ontologia deve permitir a expansão para incluir as informações de domínio adicionais conforme necessário.

Levar em consideração esses desafios na criação de uma ontologia ajuda a garantir rigor e validade, contemplados pelo aspecto pragmático aplicado ao domínio.

Uma das principais tecnologias para representar o conhecimento na Web Semântica é a *Web Ontology Language* (OWL). OWL é um padrão do *World Wide Web Consortium* (W3C) para expressar ontologias e a sua base lógica é fornecida pela lógica de descrição (DL – *Description Logic*) e, como tal, seu paradigma de representação de conhecimento subjacente é baseado na lógica de primeira ordem (Baader et al., 2007).

Outro paradigma de representação do conhecimento são os formalismos baseados em regras, fundamentados na programação lógica. Devido ao uso extensivo de regras em aplicações práticas, foram realizados esforços para combinar regras com ontologias. Um resultado é o desenvolvimento da *Semantic Web Rule Language* (SWRL) que é uma linguagem projetada para se integrar ao OWL, estendendo a expressividade do OWL através do acréscimo de regras Horn (Horrocks et al., 2004).

Desta forma, a modelagem do conhecimento de domínio ganha um recurso adicional, uma vez que, as limitações expressivas dos formalismos OWL podem ser aumentadas pelos recursos de regras projetadas para a afirmação complexa de fatos que vão além da simples declaração de conceitos de domínio (Kreider, 2013; Lawan & Rakib, 2019).

2.4 Ontologias de Fundamentação

As ontologias de domínio podem apresentar falta de padronização em seu processo de construção. Assim, é possível existir um conjunto de ontologias que, muitas vezes, não são interoperáveis. As ontologias de fundamentação ajudam a promover interoperabilidade entre ontologias de domínio ao oferecer compreensão semântica que suporte o intercâmbio, recuperação, descoberta, integração e análise de dados (Farinelli & Souza, 2021).

Ontologias, no sentido filosófico, têm sido desenvolvidas em filosofia desde Aristóteles, que baseado em discussões anteriores, funda a sua teoria de substância e acidentes. Mais recentemente, várias dessas teorias têm sido propostas sob o nome de Ontologias de Fundamentação (*Foundational Ontologies*). Desde o fim da década de oitenta, observa-se um crescente interesse no uso dessas ontologias de fundamentação no processo de avaliação e (re)engenharia de linguagens de modelagem conceitual. A hipótese inicial, e que foi posteriormente confirmada por várias evidências empíricas, pode ser explicada através da seguinte argumentação:

- i) Modelos conceituais são artefatos produzidos com o objetivo de representar uma determinada porção da realidade (domínio) segundo uma determinada conceituação;
- ii) Ontologias de Fundamentação descrevem as categorias que são usadas para a construção dessas conceituações.

Portanto, pode-se concluir que uma linguagem adequada de modelagem conceitual deveria possuir primitivas de modelagem que refletissem as categorias conceituais definidas em uma Ontologia de Fundamentação (Guizzardi et al., 2008).

Borgo e Masolo (2009) definem que ontologias de fundamentação tem grande alcance, podem ser altamente reutilizáveis em cenários diferenciados de modelagem, são filosófica e conceitualmente bem fundamentadas e são semanticamente transparentes e, portanto, ricamente axiomadas (Borgo & Masolo, 2009).

Uma ontologia de fundamentação auxilia os modeladores de ontologia de domínio e de tarefa a decidir sobre as categorias mais adequadas para representar um conceito baseado em suas metapropriedades. A partir de um ponto de vista cognitivo e ontológico é possível obter diferentes categorias de objetos que implicam em diferentes tipos de classificação das relações entre os tipos de objetos e suas instâncias (Guizzardi et al., 2011).

A forma ideal de integrar conhecimento heterogêneo em várias ontologias é utilizar uma ontologia de fundamentação como uma referência na definição de ontologias de domínio, pois minimiza os erros ou inconsistências, descrevem as categorias independentes de domínio e fornecem um meio de verificar restrições ontológicas básicas (Farinelli & Souza, 2021).

2.5 UFO – *Unified Foundational Ontology*

A ontologia de fundamentação chamada Ontologia Fundamental Unificada (UFO - *Unified Foundational Ontology*) é adotada no desenvolvimento da ontologia desta tese. A UFO é uma Ontologia de Fundamentação que tem sido desenvolvida ao longo dos últimos

anos reunindo teorias axiomáticas que versam sobre as principais categorias de conceitos usados em modelagem conceitual (Guizzardi, 2005).

A UFO tem sido aplicada com sucesso para avaliar modelos de linguagens de modelagem conceitual assim como para prover semântica do mundo real para seus elementos de modelagem. Por se tratar de uma ontologia voltada principalmente para modelagem conceitual, pode-se considerar que um método com diretrizes para a construção de conceitos pautado nos fundamentos desta ontologia proporcionará um melhor alinhamento das definições que serão construídas com modelos conceituais que venham a ser gerados a partir destas definições (Guizzardi et al., 2008).

Em modelagem conceitual, a UFO se organiza em *Universals*, que se refere a tipos (classes, entidades) e em *Individuals*, que se refere às instâncias dos tipos. Os universais são os padrões existentes no mundo (entidades reais genéricas) que podem ser instanciados em indivíduos. Os tipos ou classes são organizados de acordo com a natureza ontológica/metafísica de suas propriedades e outros princípios e são classificadas em: *Kinds*, *Subkinds*, *Phases*, *Roles*, *Categories*, *Mixins* e *RoleMixins*. Alguns tipos são persistentes (*endurants*) ou ocorrências (*occurents*); outros têm propriedades essenciais ou acidentais; e outros ainda podem ser contados ou ordenados (*sortals*). Estes tipos podem ser rígidos ou anti-rígidos, no sentido de que suas instâncias podem alterar seu tipo original. Ou seja, se uma classe é rígida, isso significa que suas instâncias mantêm seus "princípios de identidade" únicos durante a sua existência. Assim, uma coisa que é algo que nunca passa a ser outra coisa. Isso equivale a afirmar que uma classe rígida não pode alterar suas instâncias de uma classe rígida para outra classe rígida (Marek Suchánek, 2021). Em resumo, as classes são entendidas como:

- *Kinds* e *Subkinds* que representam propriedades essenciais dos objetos. São tipos rígidos ou estáticos. Um *Kind* captura as propriedades essenciais de objetos de um domínio e podem ser subdivididos em *Subkinds*. Como exemplo, o *Kind* "Área" pode ser especializado nas *Subkinds* "Andar" e "Espaço".
- *Phases* (Fases) que representam tipos de classes que possuem propriedades intrínsecas aos objetos, enquanto os *Roles* (Papéis) representam tipos de classes que possuem propriedades que os objetos têm em um contexto relacional, ou seja, propriedades relacionais contingentes (extrínsecas). Como exemplo, uma certificação pode estar na fase "Concluída" e desempenhar o papel de classificação em um nível de certificação do tipo "Gold".
- *Categories* representam propriedades essenciais que são compartilhadas por entidades de tipos distintos. Como exemplo, a localização geoespacial de uma edificação, de um parque ou de um ponto de ônibus.

- *Mixins* representam propriedades compartilhadas para coisas com princípios de identidade diferentes. Já *RoleMixins* é equivalente a um *Role* para tipos que agregam instâncias com diferentes princípios de identidade. Como exemplo, podemos agregar papéis distintos de componentes de um material de construção em um *RoleMixin*.

Além das relações entre as classes, destaca-se a classe *Relator* que representa a objetivação de propriedades relacionais entre coisas. Relatores são relacionados a entidades que se relacionam por meio de uma relação de mediação. Os *Relators* também representam a dependência relacional de *Roles* e *Mixins*. Por isso, *Roles* e *RolesMixins* devem ser relacionados a algum relator, por meio de uma relação de *mediation* (mediação). Como exemplo, uma classe referente ao processo de certificação pode conter as propriedades relacionais entre ambiente construído e certificação LEED.

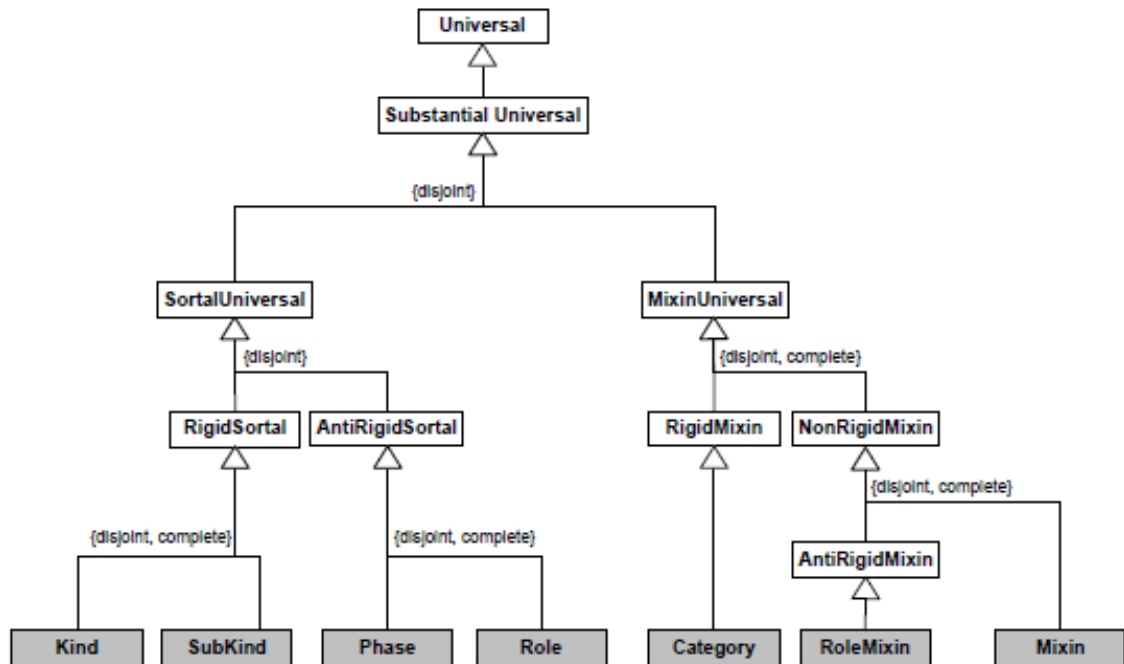
A UFO é dividida em camadas incrementais denominadas: UFO-A (ontologia de *endurantes*), UFO-B (ontologia de *perdurantes*) e UFO-C (ontologia de aspectos sociais) (Guizzardi et al., 2011, 2015).

UFO-A trata dos *Endurants* (também chamados de *Continuants*) que são entidades que perduram através do tempo. A Figura 1 exhibe o fragmento desta tipologia. Eles e suas partes estão sempre presentes durante sua existência. Mesmo que o valor de suas propriedades altere (ex: idade, peso, tamanho) sua identidade é preservada (Guizzardi et al., 2015).

UFO-B trata dos *Perdurants* e distingue explicitamente eventos e objetos em função das relações com o tempo. Os *Perdurants* (também chamados de *Ocurrents*) são entidades compostas de uma ou mais partes temporais. Eles acontecem no tempo no sentido em que subsistem acumulando suas partes temporais. Quando um *Perdurant* está presente em um determinado momento, apenas uma de suas partes temporais existe de fato naquele momento. Desta forma, como as partes não mantêm sua identidade ao longo do tempo, conseqüentemente os eventos não podem sofrer mudança (Guizzardi et al., 2015).

Por fim, a UFO-C é uma ontologia das entidades sociais. Ela utiliza os objetos e eventos contidos na UFO-A e UFO-B. Ela faz distinção entre agentes e substanciais inanimados. Os agentes podem ser indivíduos físicos ou sociais. Os substanciais inanimados também podem ser indivíduos físicos ou sociais (Guizzardi et al., 2015).

Figura 1 – Fragmento da tipologia dos Endurants



Fonte: (Guizzardi, 2005)

Destaca-se o desenvolvimento da gUFO¹ que fornece uma implementação leve da UFO adequada para aplicações de Web Semântica OWL. Utilizando um subconjunto de UFO-A e UFO-B, uma ontologia leve pode ser projetada para fornecer um artefato para estruturar uma base de conhecimento (Almeida et al., 2020).

¹ <https://nemo-ufes.github.io/gufo/>

3 ORGANIZAÇÃO DE INFORMAÇÕES PARA CERTIFICAÇÃO

Este capítulo aborda as questões de conhecimento para descrever a situação atual dos recursos e métodos empregados para a avaliação da certificação LEED. Para analisar as dificuldades e soluções, foi realizada a imersão no contexto por meio de levantamento bibliográfico em publicações científicas e pesquisas em sites especializados.

3.1 Tecnologia BIM

O BIM é um importante recurso para os processos de arquitetura, engenharia e construção. Com a tecnologia BIM, um modelo virtual preciso de um ambiente construído contém a geometria e os dados necessários para apoiar as atividades de todo o ciclo de vida deste ambiente. Essa tecnologia fornece base para novos recursos de projeto e construção, bem como promove mudanças nas funções e relacionamentos entre a equipe de projeto. Este é um novo modelo de trabalho que integra os especialistas das áreas de projeto e construção, uma vez que os mesmos passam a trabalhar de forma colaborativa, alterando e dinamizando o ciclo da informação. Portanto, o BIM apresenta-se como uma evolução no processo de elaboração de projetos, pois permite novas possibilidades de visualização, representação, processamento, uso e recuperação da informação (Baracho et al., 2017; Sacks et al., 2018).

Grupos de pesquisadores em *Linked Data* e Web Semântica têm trabalhado para disponibilizar dados vinculados à arquitetura, engenharia e construção na Web, relacionando dados ao invés de documentos (Borrmann et al., 2018; Curry et al., 2013). Destaca-se o grupo *Linked Data Working Group* (LDWG) no *buildingSMART International*² e o *Linked Building Data Community Group* (LBDCG)³ no W3C. Nestes grupos de padronização são propostas ontologias para capturar dados de construção usando tecnologias semânticas da Web, como OWL e RDF (W3C OWL Working Group, 2012). Assim, são criadas ontologias alinhadas, conforme a terminologia de outras ontologias, para que seja mantida uma padronização.

O *buildingSMART* mantém o *Industry Foundation Classes* (IFC), que é o formato de troca de dados de um modelo BIM entre *softwares*. O IFC se baseia na linguagem e conceitos EXPRESS, que consiste em fornecer definições gerais e amplas de produtos, bem como a organização de dados para elaboração de modelos detalhados e específicos e de tarefas que suportam trocas específicas. A linguagem EXPRESS utiliza termos como tipos, entidades e propriedades, e regras que devem ser usadas para criar um esquema específico

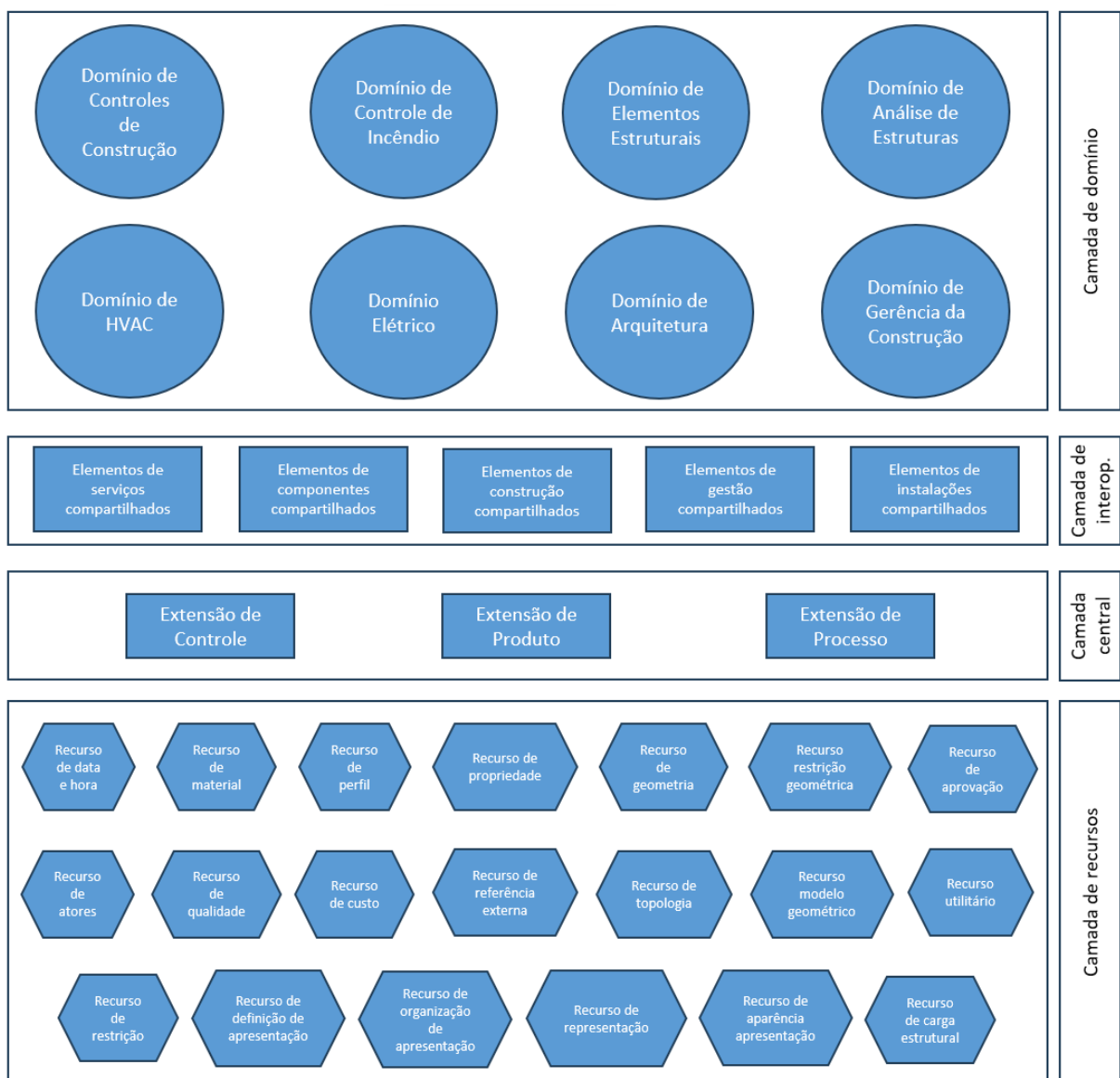
² <https://www.buildingsmart.org/>

³ <https://www.w3.org/community/lbd/>

(Pauwels & Terkaj, 2016). Nesse sentido, o IFC foi projetado para tratar de todas as informações de um ambiente construído, durante todo o seu ciclo de vida, desde a viabilidade e o planejamento, a análise e a simulação na fase de projeto e construção, até a ocupação e operação (Sacks et al., 2018).

O padrão IFC foi desenvolvido de forma modular, organizando cada tipo de dados a um sub esquema específico. Conforme exibido na Figura 2, a camada de domínio contém especializações finais de entidades, organizando as definições por área. As entidades definidas nesta camada são independentes e não podem ser referenciadas por nenhuma outra camada (Liebich et al., 2013).

Figura 2 – Camadas conceituais do esquema IFC



Fonte: Liebich et al. (2013).

Muitos dos tipos de dados no esquema IFC estão estreitamente interconectados, não apenas dentro de um sub esquema, mas também entre diferentes sub esquemas. Além disso, em vários casos, existem dependências recíprocas entre sub esquemas, mesmo pertencendo a camadas separadas (Terkaj & Pauwels, 2017).

No entanto, o modelo de dados IFC é projetado para a criação e troca de dados do produto, mas não adaptado para várias tarefas de consulta e análise. Muitos relacionamentos e propriedades úteis que são explicitamente definidos ou implícitos nos modelos são difíceis de recuperar. Além disso, o IFC não é flexível o suficiente para se adaptar a situações em que dados de diferentes fontes precisam ser integrados e processados. Embora o IFC seja um modelo de dados com o objetivo de cobrir toda a indústria da construção civil, muitas informações usadas em cenários comuns da indústria não são especificadas no escopo deste formato, incluindo, por exemplo, classificações de produtos, requisitos de construção e regulamentos, bem como dados de construções vizinhas, planejamento urbano e redes de sensores (Zhang, C.; Beetz; De Vries, 2018).

Niknam e Karshenas (2015) destacam outras limitações que dificultam o compartilhamento e a combinação de informações entre vários aplicativos de domínio de construção:

- O esquema de domínio é local e não pode ser compartilhado entre aplicativos ou na Web. Portanto, dois aplicativos não podem compartilhar informações sem um programa personalizado ou usando um formato de dados padrão;
- Os esquemas do aplicativo não podem ser modificados dinamicamente. Quaisquer alterações em um esquema de aplicativo exigiria a revisão do *software* escrito para o esquema. Na estimativa de custo de construção, isso exigiria um novo programa de suplemento para uma nova versão de um aplicativo BIM;
- Cada domínio desenvolve uma hierarquia de classes separada para o mesmo conjunto de objetos. Por exemplo, o mesmo edifício seria modelado usando duas hierarquias de classes diferentes no projeto e nos domínios de estimativa. Isso significa que o mesmo elemento no mesmo edifício pertenceria a duas classes diferentes. No entanto, em sistemas orientados a objetos, as classes definidas em domínios diferentes para representar o mesmo objeto não podem compartilhar propriedades de instância.

As características atraentes da Web Semântica motivaram o trabalho de conversão do esquema IFC em uma ontologia OWL. O grupo LDWG, de domínio da *buildingSMART*, concentra-se principalmente na produção da ontologia ifcOWL. Essa ontologia é desenvolvida para ser uma tradução direta do esquema IFC em uma representação OWL, conforme resumo apresentado na Tabela 1, permitindo que se continue usando esse padrão estabelecido para representar dados de construção. Além disso,

possibilita explorar as tecnologias da Web Semântica em termos de distribuição de dados, extensibilidade do modelo de dados e recuperação de informações, e reutilizar implementações de *software* de uso geral para armazenamento de dados, verificação de consistência e inferência de conhecimento (Pauwels & Terkaj, 2016).

Tabela 1 – Resumo das principais conversões

IFC	OWL	Observações
Entity e Defined Data	owl:Class	São as próprias entidades do modelo, com um conjunto de atributos e restrições próprios.
SubTypeOf e SuperTypeOf	rdfs:subClassOf	Diferenciação entre conceitos gerais e específicos.
Select Types	owl:ObjectProperty	Permitem que um atributo possa ser de um conjunto específico de tipos ou entidades.
Types e Simple Data	owl:DatatypeProperty	Tipos de dados simples
Attributes	owl:ObjectProperty	Atributos transformados em papéis.
Enumerations Data type	owl:oneOf de owl:NamedIndividual	Listas de valores possíveis
Select Data type	owl:unionOf	Relacionado às classes
Inverse	owl:inverseOf	Inversão de conceitos
Attribute of entity data type Cardinality	owl:AllValuesFrom ou owl:qualifiedCardinality ou owl:maxQualifiedCardinalit	Atributos convertidos em restrições
Where domain rule	SWRL rules	Definição de regras

Fonte: Adaptado de Beetz et al. (2005).

A ontologia ifcOWL é extensa e diferente de muitas das ontologias existentes em vários outros domínios, que geralmente têm escopo mais restrito e dependem de extensões ativadas por princípios de dados vinculados. Por esse motivo, existem tentativas de simplificar essa ontologia, como IFCWoD (de Farias et al., 2015), SimpleBIM (Pauwels & Roxin, 2016), BIMSO e BIMDO (Niknam & Karshenas, 2017), BimSPARQL (C. Zhang et al., 2018) e BOT (Rasmussen et al., 2018).

O IFCWoD (*IFC Web of Data*) implementa uma adaptação do modelo IFC ao OWL, considerando as restrições de modelagem exigidas pela estrutura orientada a objetos do esquema IFC. O modelo desenvolvido tem a estrutura baseada em grafos RDF e os recursos da OWL para inferência de dados, aproveitando assim todas as restrições de modelagem exigidas pela estrutura orientada a objetos da linguagem EXPRESS. Os autores da ontologia IFCWoD apresentam comparações com outras soluções demonstrando que o modelo proposto proporciona a otimização do tempo de execução da consulta (de Farias et al., 2015).

Entretanto, as ontologias ifcOWL e IFCWoD, mencionadas acima, permanecem próximas ao esquema IFC original, conforme disponível na linguagem de modelagem de informações EXPRESS. Pauwels e Roxin (2016) argumentam que este critério, adotado nestas ontologias, apresenta duas consequências principais:

- Muitas das construções semânticas específicas do EXPRESS (como tipos de dados SELECT, tipos de dados LIST) são mantidas e resultam em construções complexas e não intuitivas em OWL e RDF.
- Os grafos de instância são pelo menos tão grandes e complexos quanto os modelos IFC originais.

As sugestões no domínio da Web Semântica geralmente incluem ontologias simples para representar ambientes construídos sem o uso de IFC. Diversas simplificações de grafo RDF são propostas, resultando em abordagens claramente definidas para simplificar o modelo BIM. O SimpleBIM segue esta linha de pesquisa, implementando regras de reescrita no código através da programação direta usando API (*Application Programming Interface*) da Web Semântica, do uso de consultas SPARQL e do uso de regras lógicas em um mecanismo de inferência baseado em OWL-DL (Pauwels & Roxin, 2016).

O BIM *Shared Ontology* (BIMSO) e o BIM *Design Ontology* (BIMDO) constituem outra abordagem de modularidade com ontologias projetadas do zero e, portanto, não têm conexão com o IFC. A criação destas ontologias sugere que a representação semântica do ambiente construído facilita encontrar e integrar as informações de elementos distribuídas em várias bases de conhecimento. O BIMSO possui um núcleo mínimo e baseia-se no sistema de classificação UNIFORMAT II e o BIMDO fornece terminologia específica para o projeto (Niknam & Karshenas, 2017).

O BimSPARQL também simplifica os dados ifcOWL, e utiliza regras declarativas com programação procedural para implementar funções estendidas para consultas. Através da linguagem de consulta para RDF é realizado o raciocínio espacial e lógico considerando a aplicação com dados com outras fontes (C. Zhang et al., 2018).

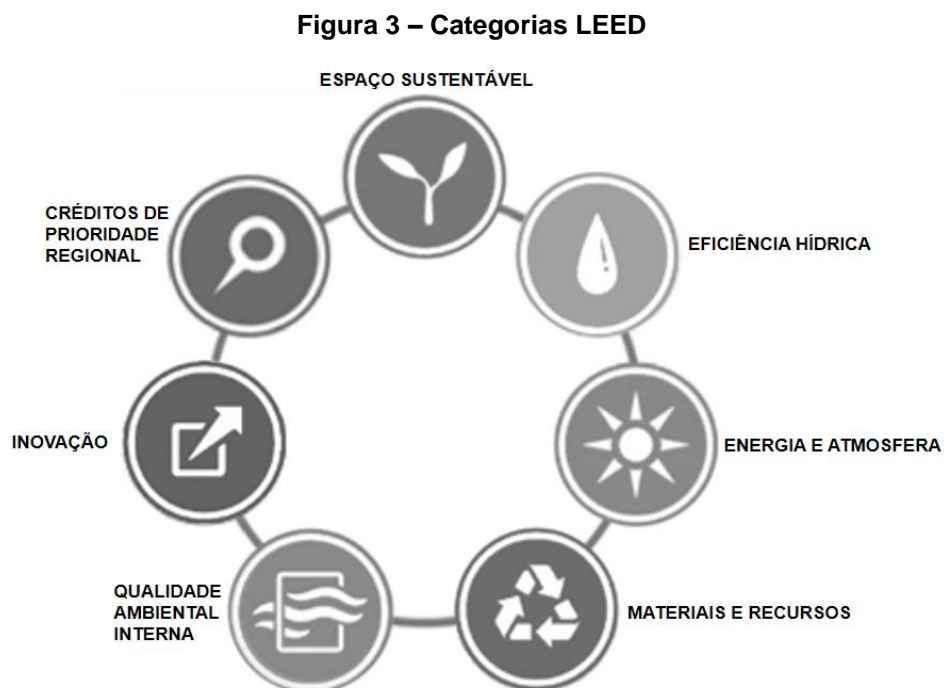
Uma abordagem de simplificação que busca definir uma ontologia explícita da OWL é a *Building Topology Ontology* (BOT) que envolve a publicação de produtos de um ambiente construído e propriedades associadas na Web, usando os princípios do *Linked Building Data*. Os autores desta ontologia destacam que as ontologias existentes no escopo dos edifícios redefiniram os mesmos elementos básicos (por exemplo, espaços, andares e elementos) e as suas relações. Assim, uma ontologia mínima e extensível para esse único objetivo foi proposta com o desenvolvimento de um esforço comunitário pelo W3C LBD *Community Group* (Rasmussen et al., 2018).

3.2 Sistema LEED

O LEED é um sistema internacional de certificação de ambientes construídos, criado nos Estados Unidos e utilizado em mais de 160 países. Pode-se afirmar que esse é o

método mais utilizado para avaliar o desempenho ambiental de um edifício. Segundo a organização *Green Building Council Brasil*⁴, o Brasil possui mais de 600 empreendimentos certificados.

Esse sistema de certificação foi desenvolvido para fornecer aos proprietários e operadores de edifícios uma estrutura concisa para identificar e implementar soluções práticas e mensuráveis de projeto, construção, operação e manutenção de edifícios verdes. Conforme apresentado na Figura 3, os critérios LEED são organizados em sete categorias: espaços sustentáveis, eficiência hídrica, energia e atmosfera, materiais e recursos, qualidade ambiental interna e inovação (USGBC, 2020).



Fonte: USGBC (2020).

Sob esse sistema de avaliação, um ambiente construído pode ganhar até 110 pontos. Além dos créditos por critério, cada seção do sistema LEED inclui pré-requisitos que devem ser obtidos, mesmo que não contam para o total da pontuação.

O LEED pode ser aplicado em quase todos os tipos de projeto e adequa a diversas tipologias com adaptações específicas:

- **Envoltória e Núcleo Central**: aplicado em projetos em que o desenvolvedor controla o projeto e a construção do sistema mecânico, hidráulico e de proteção contra incêndio.
- **Data Centers**: projetado e equipado para atender às necessidades de equipamentos de computação de alta densidade para armazenamento e processamento de dados.

⁴ <https://www.gbcbrazil.org.br/>

- Unidades de Saúde: destinado a hospitais com funcionamento integral e ininterrupto.
- Hospedagem: dedicado a hotéis, motéis, pousadas ou outros negócios que fornecem alojamento de transição ou de curto prazo com ou sem comida.
- Varejo: aborda as necessidades exclusivas dos varejistas (bancos, restaurantes, vestuário, eletrônicos, lojas de departamento e outros).
- Escolas: direcionado a espaços de aprendizagem principais e auxiliares.
- Galpões e Centros de Distribuição: direcionado a edifícios usados para armazenar mercadorias, produtos manufaturados, matérias-primas ou pertences pessoais.
- Novas Construções e Grandes Reformas: utilizado para edifícios novos ou grandes reformas cujo uso não se adequa aos especificados acima.

Para a avaliação destes tipos, os pontos são distribuídos de forma desigual entre as categorias. Na Tabela 2 são apresentados os critérios para avaliação de uma nova construção. Ao todo são 37 critérios e 17 pré-requisitos descritos no manual (USGBC, 2020).

Tabela 2 – Critérios LEED para nova construção

Localização e Transporte	
Localização do LEED Neighborhood (Bairros)	20
Proteção de Áreas Sensíveis	2
Local de Alta Prioridade	3
Densidade do Entorno e Usos Diversos	6
Acesso a Transporte de Qualidade	6
Instalações para Bicicletas	1
Redução da Área de Projeção do Estacionamento	1
Veículos Verdes	1
Créditos de Prioridade Regional	
Prioridade Regional: Crédito Específico	1
Prioridade Regional: Crédito Específico	1
Prioridade Regional: Crédito Específico	1
Prioridade Regional: Crédito Específico	1
Terrenos Sustentáveis	
Prevenção da Poluição na Atividade de Construção	Obrigatório
Avaliação do Terreno	1
Desenvolvimento do Terreno - Proteger ou Restaurar Habitat	2
Espaço Aberto	1
Gestão de Águas Pluviais	3
Redução de Ilhas de Calor	2
Redução da Poluição Luminosa	1
Projeto do Inquilino e Diretrizes de Construção	1
Eficiência Hídrica	
Redução do Uso de Água do Exterior	Obrigatório

Redução do Uso de Água do Interior	Obrigatório
Medição de Água do Edifício	Obrigatório
Redução do Uso de Água do Exterior	2
Redução do Uso de Água do Interior	6
Uso de Água de Torre de Resfriamento	2
Medição de Água	1
Energia e Atmosfera	
Comissionamento Fundamental e Verificação	Obrigatório
Desempenho Mínimo de Energia	Obrigatório
Medição de Energia do Edifício	Obrigatório
Gerenciamento Fundamental de Gases Refrigerantes	Obrigatório
Comissionamento Avançado	6
Otimizar Desempenho Energético	18
Medição de Energia Avançada	1
Resposta à Demanda	2
Produção de Energia Renovável	3
Gerenciamento Avançado de Gases Refrigerantes	1
Energia Verde e Compensação de Carbono	2
Materiais e Recursos	
Armazenamento e Coleta de Recicláveis	Obrigatório
Plano de Gerenciamento da Construção e Resíduos de Demolição	Obrigatório
Redução do Impacto do Ciclo de Vida do Edifício	6
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Declarações Ambientais de Produto	2
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Origem de Matérias-primas	2
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Ingredientes do Material	2
Gerenciamento da Construção e Resíduos de Demolição	2
Qualidade do Ambiente Interno	
Desempenho Mínimo da Qualidade do Ar Interior	Obrigatório
Controle Ambiental da Fumaça de Tabaco	Obrigatório
Estratégias Avançadas de Qualidade do Ar Interior	2
Materiais de Baixa Emissão	3
Plano de Gestão da Qualidade do Ar Interior da Construção	1
Luz Natural	3
Vistas de Qualidade	1
Inovação	
Inovação	5
Profissional Acreditado LEED	1

Fonte: USGBC (2020).

Existem quatro níveis de certificação LEED que são determinados pelo número de pontos atribuídos: 40 a 49 pontos LEED Certified, 50 a 59 pontos LEED Silver, 60 a 79 pontos LEED Gold e 80 a 110 pontos LEED Platinum. Durante a construção, a documentação de apoio e as evidências são compiladas e enviadas ao USGBC. Com base nessas

informações, o USGBC realiza a avaliação e concede a certificação, tendo como um dos critérios a conclusão da construção. Quaisquer alterações realizadas durante a construção exigem um novo envio da documentação de apoio (Azhar et al., 2011).

A análise sobre a sustentabilidade ambiental é obrigatória para todos os projetos que buscam a certificação LEED. Anteriormente, o processo de certificação LEED e a aplicação do modelo BIM eram dois processos separados e executados por duas equipes. É possível encontrar estudos que propõem agilizar o processo de certificação LEED usando modelos BIM, que podem armazenar informações multidisciplinares usadas para certificação. Em comparação com os métodos tradicionais, os métodos para certificação suportados por BIM podem economizar tempo e recursos substanciais (Wong & Zhou, 2015).

3.3 Sistema AQUA

Outro sistema bem aplicado no Brasil é o referencial técnico brasileiro AQUA (Alta Qualidade Ambiental) que foi desenvolvido por professores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e implantado pela Fundação Vanzolini. Esse sistema é uma adaptação do método HQE (*Haute Qualité Environnementale*) à realidade brasileira. O processo de certificação passa por auditorias presenciais e, apesar de se espelhar em um método francês, é independente de órgãos franceses (Grünberg et al., 2014).

O sistema AQUA avalia o desempenho ambiental de uma construção pela sua gestão e por sua natureza arquitetônica e técnica. O processo é estruturado em dois instrumentos principais: o Sistema de Gestão do Empreendimento e o referencial de Qualidade Ambiental do Edifício (Vanzolini, 2022). A metodologia AQUA é composta por catorze categorias, agrupadas em quatro famílias:

- Eco-construção: relação do edifício com o seu entorno, escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos, canteiro de obras com baixo impacto ambiental.
- Gestão da energia: gestão da água, gestão dos resíduos de uso e operação do edifício, manutenção quanto a permanência do desempenho ambiental.
- Conforto: conforto higrotérmico, conforto acústico, conforto visual e conforto olfativo.
- Saúde: qualidade sanitária dos ambientes, qualidade sanitária do ar e qualidade da água.

Os níveis que uma edificação pode obter pelo processo AQUA são relacionados à qualidade ambiental do edifício. Apesar da fase de uso e operação da edificação não ser contemplada pela certificação, o processo AQUA incorpora elementos que facilitam o desempenho ambiental após a entrega da obra (Sugahara et al., 2021). De acordo com o

manual deste sistema, o desempenho associado ao ambiente construído pode ser Bom, Superior ou Excelente (Vanzolini, 2022).

3.4 Comparativo entre os sistemas de certificação

Além do LEED e AQUA, destacam-se também outros sistemas como PROCEL e Selo Casa Azul.

O Selo Casa Azul possui 53 critérios de avaliação, distribuídos em seis categorias que orientam a classificação dos projetos em três níveis (Ouro, Prata e Bronze). Esse sistema busca reconhecer os empreendimentos que adotam soluções mais eficientes aplicadas à construção, ao uso, à ocupação e à manutenção das edificações, objetivando incentivar o uso racional de recursos naturais e a melhoria da qualidade da habitação e de seu entorno. Pode ser aplicado em todos os tipos de projetos de empreendimentos habitacionais apresentados à Caixa Econômica Federal para financiamento ou programas de repasse (John & Prado, 2010).

Já o Selo PROCEL Edificações (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica para Edificações) é um instrumento do governo brasileiro, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás. Esse sistema objetiva identificar as edificações que apresentem as melhores classificações de eficiência energética em uma categoria, motivando o mercado consumidor a adquirir e utilizar imóveis mais eficientes. O processo envolve a avaliação da envoltória, aquecimento de água, iluminação e condicionamento de ar (PROCEL, 2005).

Os sistemas apresentados nesta tese apresentam fatores em comum, como a preocupação com o meio ambiente, geração de resíduos e preservação de recursos naturais. Esses certificados ambientais buscam assegurar que um edifício possua impactos ambientais reduzidos pela implantação de ações sustentáveis (Sugahara et al., 2021).

Sugahara, Freitas e Cruz (2021) realizaram um estudo comparativo entre essas certificações (Tabela 3), comentando as diferentes metodologias de avaliação, características gerais, categorias avaliadas e níveis de classificação. Os autores destacaram que o AQUA e Casa Azul, por realizar a avaliação baseada em desempenho, podem ser considerados como métodos modernos por evitar distorções na avaliação do empreendimento. Por outro lado, o LEED apresenta um método de avaliação baseado em pontos, que não exige o atendimento de todos os requisitos para obter o selo verde. A certificação LEED caracteriza-se por avaliar a localização do projeto quanto aos critérios dos créditos regionais, na qual o empreendimento é pontuado se atender a determinados requisitos das outras categorias. Verifica-se ainda que

a certificação LEED abrange um número maior de tipos de empreendimentos, se comparado às demais certificações.

Tabela 3 – Comparativo entre os sistemas de certificação

Característica	AQUA	LEED	Casa Azul	PROCEL
Modelo	Brasileiro com base conceitual francesa (HQE)	Norte americano	Brasileiro	Brasileiro
Entidade responsável	Fundação Vanzolini	U.S. Green Building Council	Caixa Econômica Federal	ELETROBRAS/ Ministério de Minas e Energia
Lançamento	2008	1993	2010	2003
Método	Avaliação é feita para cada uma das 14 categorias de preocupação ambiental, devendo atingir o perfil mínimo de desempenho em cada nível conforme perfil ambiental definido pelo empreendedor na fase de pré-projeto.	Avaliação baseada em pontos que verificam a adequação dos itens obrigatórios e classificatórios de cada categoria.	São avaliadas, na metodologia deste selo, as soluções eficientes aplicadas à construção, ao uso, à ocupação e à manutenção das edificações.	Prescritivo (avaliação da edificação através das equações e tabelas estipuladas pelo RTQC ou RTQ-R) ou Simulação (compara os parâmetros da edificação proposta com um modelo de referência em eficiência energética)
Categorias avaliadas	Eco construção, Eco gestão, Conforto, Saúde.	Localização e transporte, Espaço Sustentável, Gestão e uso racional da água, Energia e Atmosfera, Materiais e recursos, Qualidade Ambiental Interna, Inovação e Processo de Projeto e Créditos Regionais.	Qualidade urbana, Projeto e conforto, Eficiência energética, Conservação de recursos materiais, Gestão da água e Práticas sociais	Envoltória, Iluminação, Condicionamento de ar e Bonificações.
Níveis de classificação	Base, Boas Práticas ou Melhores Práticas	Certificado, Prata, Ouro e Platina	Bronze, Prata e Ouro	Sem graduações
Fases avaliadas	Pré-projeto, Projeto, Execução, Operação e Uso	Programa, concepção, execução, operação e uso	Concepção e realização	Fase de projeto e após a construção do edifício
Expressão dos resultados	Alcance do perfil mínimo em cada nível e categoria	Nível Global de Desempenho	Perfil de desempenho nas diferentes categorias	Atingir Nível A nas categorias avaliadas

Benefícios	Melhor qualidade de vida do usuário; Economia de água e energia; Disposição de resíduos e manutenção; Contribuição para o desenvolvimento socioeconômico ambiental da região.	Valorização do empreendimento na venda e locação; melhor qualidade de vida do usuário; redução geral do impacto ambiental na vida útil; menores custos de manutenção.	Redução do impacto ambiental e na vizinhança durante a vida útil; fortes ações sociais durante a pós construção; melhor qualidade de vida do usuário; menores custos de manutenção e infraestrutura.	Melhor qualidade de vida dos usuários; economia no consumo de energia e água; máxima eficiência do edifício quanto aos sistemas avaliados (envoltória, iluminação e ar-condicionado).
Extras	Exige desempenho satisfatório em todas categorias e fases.	Reconhecimento internacional; flexibilidade de critérios; formato de <i>checklist</i> .	Criado para realidade brasileira; Garantia da construção da edificação; voltado para habitações populares.	Criado para a realidade brasileira, visando os aspectos de desempenho energético.

Fonte: Sugahara et al. (2021).

Apesar do LEED receber críticas quanto ao seu método de pontuação, bem como ser desenvolvido para a realidade norte americana, sua aplicação no cenário mercadológico é vantajosa pela simplicidade de entendimento. Outro fator é a existência dos níveis de certificação que possibilitam ao investidor escalonar o investimento de acordo com o nível pretendido, dando origem a um empreendimento mais sustentável e com um selo certificador amplamente conceituado, favorecendo os ganhos na comercialização (Costa et al., 2021). Diante disso, este trabalho escolheu a certificação LEED para integração de dados e realização das inferências para apoio na obtenção das possíveis pontuações do ambiente construído.

A sustentabilidade dos ambientes construídos tornou-se uma consideração crítica na elaboração de projeto de ambientes construídos, uma vez que as decisões tomadas nas fases iniciais têm influência significativa nos impactos ambientais reais. Os métodos de elaboração de projeto tradicionais são limitados na análise contínua da sustentabilidade durante o planejamento do projeto, devido às informações serem fragmentadas. Um modelo BIM pode ser usado como um banco de dados, facilitando o intercâmbio e a integração com base nas classes do IFC. Em relação à fase de projeto, o BIM permite que informações multidisciplinares sejam sobrepostas em um modelo, o que cria uma oportunidade para que medidas de sustentabilidade sejam incorporadas ao longo do projeto. Com a ajuda de aplicativos baseados em BIM, arquitetos e engenheiros podem compartilhar mais efetivamente informações relacionadas à sustentabilidade, como iluminação natural e consumo de energia, e assim a análise pode ser perfeitamente integrada ao projeto. O BIM também pode ajudar os projetistas a utilizar os conjuntos de dados de construção existentes

para otimizar a configuração padrão para simulações de desempenho de construção durante as fases iniciais do novo projeto de construção (Lu et al., 2017).

A utilização do BIM em projetos de edifícios verdes criou o conceito de “BIM verde”, que foi explorado por estudos aplicando conceitos como edifícios verdes, projeto sustentável e construção sustentável. A partir destas pesquisas, (Wong & Zhou, 2015) definem o BIM verde como "um processo baseado em modelo de geração e gerenciamento de dados de construção coordenados e consistentes durante o ciclo de vida do projeto, que melhora o desempenho de eficiência energética do edifício e facilita estabelecer metas de sustentabilidade”.

A partir da integração entre BIM e edifícios verdes, surgem oportunidades para desenvolver ferramentas mais práticas para fins de certificação de edifícios verdes, melhorando a compatibilidade e a facilidade de uso pelos especialistas. Conciliado às limitações destacadas anteriormente sobre o formato IFC, a busca por soluções aplicando tecnologias semânticas visa atender às melhores práticas para integração, recuperação das informações e geração de novos conhecimentos.

3.5 Trabalhos Correlatos

A busca por trabalhos correlatos foi realizada no Portal CAPES em 2021, considerando as bases de dados Scielo, Scopus, Web of Science e Google Scholar, com os termos relacionados a esta tese (“Ontology” and “BIM” and “LEED” or “Ontology” and “SWRL” and “BIM” and “LEED” or “Ontology” and “Inference” and “BIM” and “LEED” or “Ontology” and “SPARQL” and “BIM” and “LEED”).

Dentre os resultados apresentados, destaca-se que alguns pesquisadores investigaram interdependências multidisciplinares para o projeto de construções verdes com foco na otimização computacional e colaboração na elaboração de projetos (Azhar et al., 2011; Geyer, 2012; Hong et al., 2019). Os autores afirmam que a ontologia tem um papel importante na interoperabilidade e no processo de análise de dados onde novos fatos podem ser inferidos e convertidos em conhecimento através de expressões factuais e consulta estruturada.

É possível identificar estudos relacionados ao uso de ontologias para identificação de materiais e análises automatizadas de características da construção para certificação verde. A exploração de gráficos conceituais e conceitos da Web Semântica é uma possível solução para desenvolver um sistema de verificação sobre as soluções sustentáveis em edifícios, no qual, associando OWL e SRWL são realizadas inferências para a automação desta análise (Kamsu-Foguem et al., 2019).

Zhang, D. et al. (2019) abordam a utilização de ontologia com regras SWRL para inferências na indicação da pontuação em tempo real de projetos para certificação verde em um ambiente informatizado de comunicação social.

Jiang, Wang e Wu (2018) também apresentam uma ontologia com utilização de regras SRWL, no qual os resultados experimentais demonstraram que a base de conhecimento BIM para a avaliação da construção verde poderia realizar o compartilhamento, manutenção e aquisição de conhecimento entre os diferentes participantes do projeto e melhorar o gerenciamento da construção verde.

Nesta mesma linha de pesquisa, (Xu et al., 2019) demonstram que a utilização da inferência ontológica para um item de avaliação permite pesquisa automatizada dos aspectos que necessitam de melhorias na edificação e ajuda os gerentes de projeto a usar os dados BIM com mais facilidade e eficácia.

A avaliação da eficiência energética é um dos critérios para uma construção sustentável e certificada. (Esnaola-Gonzalez et al., 2018) apresentam um processo para esta análise, aplicando regras de inferências associadas a integração de ontologias BIM, conforme as fases para descoberta de conhecimento em bases de dados. Este estudo contribui apenas para um critério da certificação LEED.

Conforme a utilização de regras lógicas, (Zhang, C.; Beetz, 2016) propõem o uso de funções estendidas, compatíveis com SPARQL, como uma abordagem genérica e reutilizável em muitos casos de uso. Os autores apresentam uma aplicação para analisar a conformidade de dados de uma construção. Porém, o estudo realizado não leva em consideração o atendimento a critérios para certificação LEED.

Outro aspecto abordado envolve a consideração de que alguns dados podem apresentar informações imprecisas. (Gómez-Romero et al., 2015) apresentam uma extensão baseada em regras lógica *fuzzy* de dados BIM para fornecer suporte na representação e recuperação no contexto BIM. É proposta uma linguagem expressiva de ontologia *fuzzy* e descrito o uso de um mecanismo de inferência que permite novas funcionalidades nos estágios de projeto.

As ontologias desenvolvidas em todos os trabalhos correlatos não são construídas com base em uma ontologia de fundamentação. Além disso, todos envolvem abordagens pontuais de um critério ou uma categoria e não discutem outras tecnologias da Web Semântica como solução.

Destaca-se também que as pesquisas acima não retratam a integração com dados abertos para análise do entorno, nem a aplicação de inferências para análises quantitativas, que fazem parte dos objetivos desta tese.

Por fim, como é possível observar, a maioria destes trabalhos aborda a aplicação de regras lógicas usando SRWL. Esta pesquisa busca modelar relações mais complexas para a análise de certificação verde, abordando os conceitos da Ciência da Computação e da Ciência da Informação.

4 TECNOLOGIAS SEMÂNTICAS

É possível identificar um número crescente de pesquisas concentradas no desenvolvimento de soluções com o uso de dados vinculados e tecnologias da Web Semântica para o gerenciamento de dados da construção civil. Diante disso, este capítulo apresenta um levantamento das tecnologias semânticas que têm se destacado nessas soluções.

4.1 Regras Lógicas

As lógicas de descrição fornecem meios para modelar os relacionamentos entre entidades em um domínio de conhecimento. Nas DLs existem três tipos de entidades: conceitos, papéis e nomes de indivíduos. Conceitos representam conjuntos de indivíduos, papéis representam relações binárias entre os indivíduos e nomes representam indivíduos únicos no domínio. Tais representações são reconhecidas pela lógica de primeira ordem como predicados unários, predicados binários e constantes.

Uma consequência lógica de uma ontologia é um axioma que se aplica a todas as interpretações que satisfazem a ontologia, isto é, algo que é verdadeiro em todos os estados concebíveis do mundo que concordam com o que é dito na ontologia. Um axioma corresponde a uma regra pertinente ao domínio. Quanto mais axiomas uma ontologia contém, mais específicas são as restrições que ela impõe a possíveis interpretações e menos interpretações existem que satisfaçam a todos os axiomas. Por outro lado, se menos interpretações satisfazem uma ontologia, mais axiomas se mantêm em todas elas e consequências mais lógicas seguem a ontologia. Assim, é possível afirmar que a semântica da lógica de descrição é monotônica, pois, axiomas adicionais sempre levam a consequências adicionais ou, mais informalmente, quanto mais conhecimento é inserido em um sistema de DL, mais resultados são retornados (Krötzsch et al., 2014).

O objetivo do SWRL de aprimorar as lógicas de descrição com regras visa superar algumas limitações expressivas conhecidas nas linguagens de ontologia, que podem ser corrigidas adicionando regras à ontologia. A ideia básica foi estender o OWL DL com uma forma de regras, mantendo a compatibilidade com versões anteriores com a sintaxe e a semântica existentes no OWL. Assim, foi adicionado um novo tipo de axioma ao OWL DL, ou seja, regras da cláusula Horn, estendendo a sintaxe abstrata do OWL e a semântica teórica direta do modelo para o OWL DL, para fornecer uma semântica formal e sintaxe para ontologias de OWL, incluindo essas regras (Horrocks et al., 2005).

As regras desta linguagem têm a forma de uma implicação entre um antecedente (corpo) e um conseqüente (cabeça). Assim, sempre que as condições especificadas no antecedente se mantiverem, as condições especificadas no conseqüente também serão mantidas. Conforme apresentado na regra (1), tanto o antecedente quanto o conseqüente consistem em zero ou mais átomos. Os átomos nessas regras podem ter a forma $C(x)$, $P(x, y)$, $sameAs(x, y)$ ou $differentFrom(x, y)$, onde C é uma descrição OWL, P é uma propriedade OWL e x, y são variáveis, indivíduos OWL ou valores de dados OWL. A adição de regras também é a principal causa pela qual o raciocínio no SWRL é geralmente indecidível, mas fragmentos decidíveis são conhecidos, como regras seguras para DL (Horrocks et al., 2005).

$$\text{átomo } A1 \wedge \text{átomo } A2 \dots \wedge \text{átomo } An \rightarrow \text{átomo } B1 \wedge \text{átomo } B2 \dots \wedge \text{átomo } Bn \quad (1)$$

A semântica assegura que a condição do conseqüente seja avaliada como verdadeira sempre que as condições do antecedente forem atendidas. Como o SWRL é uma extensão da linguagem de ontologia OWL, ele é restrito a predicados DL unários e binários. Além disso, ele não suporta inferência não-monotônica e a combinação de dados OWL de ontologias externas só é possível através de construções owl:import. Uma ontologia SWRL é composta por axiomas OWL comuns e as regras SWRL constituem de antecedentes e conseqüentes, que consistem em listas de átomos. Os átomos podem ser expressões de classe OWL, definições de propriedades ou *built-ins* (Eiter et al., 2008).

Em relação à expressividade adicional do SWRL para a linguagem OWL, é possível destacar algumas vantagens como a possibilidade de usar nomes de classes ou suas descrições como predicados, o uso de igualdade e desigualdades e a utilização de conjunções de átomos no antecedente e no conseqüente do SWRL. Além disso, os avanços sintáticos, juntamente com as vantagens de expressividade das regras de programação lógica, permitem ao SWRL obter uma representação complexa do conhecimento do domínio, tornando o formalismo indispensável no projeto da Web Semântica (Horrocks et al., 2005).

Apesar das vantagens obtidas através da combinação do SWRL ao OWL, é possível considerar que esta linguagem não atenda a todas as necessidades de uma modelagem de domínio. O formalismo clássico da SWRL não pode representar adequadamente vários cenários do mundo real. Por exemplo, opiniões de especialistas, que formam uma parte considerável de todo conhecimento de domínio, podem ser apresentados como fatos imprecisos. Assim, exige formalismos capazes de representar fatos de domínio com base em algum grau de certeza ou verdade parcial. Da mesma forma, nos modelos de *software* legados, grande parte dos fatos de domínio formalizados como regras de negócios, só pode ser mantida onde outros fragmentos de conhecimento existente permanecem válidos.

Portanto, a representação precisa de tais cenários requer exclusão de conhecimento, priorização de fatos, retração de conhecimento, entre outros. Essas formas de cenários de modelagem de conhecimento são cruciais para a eficácia de sistemas especialistas e seus aplicativos relacionados. Exemplos comuns podem ser encontrados em extração e ligação de informações, processamento de informações multimídia, fusão e alinhamento automatizados de ontologias, entre outros (Shu, 2018).

Da mesma forma, o SWRL é inadequado para expressar problemas práticos que envolvem conhecimento de domínio vago ou impreciso, o que é comum em ontologias ou na Web Semântica como um todo. Além disso, mesmo com o sucesso da Web Semântica no provisionamento de dados, escrever regras de negócios usando o SWRL pode ser um desafio. Isso se deve ao fato de o SWRL, assim como outras linguagens da Web Semântica, originarem-se de lógicas clássicas, que são conhecidas por serem incapazes de modelar informações vagas ou imprecisas (Ma et al., 2014).

4.2 Grafos de Conhecimento

A utilização de grafos de conhecimento tem sido comum em pesquisas e ambientes organizacionais para representação do conhecimento. O grafo de conhecimento se baseia conceitualmente na lógica *fuzzy*, pois tem o objetivo de modelar a capacidade de raciocínio humano em um ambiente impreciso. Desta forma, a lógica *fuzzy*, associada à teoria dos conjuntos, pode ser útil em agregar e representar o conhecimento (Gomez-Perez et al., 2017).

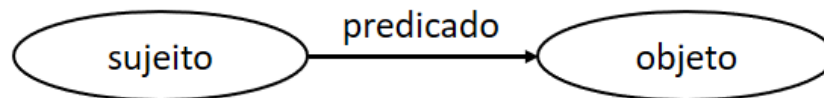
Um grafo de conhecimento é um grafo semântico que consiste em vértices (ou nós) e arestas. Os vértices representam conceitos ou entidades, onde um conceito refere-se às categorias gerais de objetos e uma entidade é um objeto no mundo real, e as arestas representam os relacionamentos semânticos entre conceitos ou entidades. Os tipos de entidades e relacionamentos são definidos por ontologias. Além disso, o grafo do conhecimento apresenta entidades e conceitos fragmentados que podem ser conectados para formar uma solução completa e estruturada para uma base de conhecimento, facilitando o gerenciamento, recuperação, uso e compreensão das informações (Yan et al., 2018).

O padrão RDF é utilizado para representar grafos de conhecimento, e os padrões RDFS (*Resource Description Framework Schema*) e OWL definem as interpretações semânticas em grafos de conhecimento. O RDF é um padrão do W3C que aborda algumas questões das redes semânticas clássicas em termos de falta de sintaxe formal e semântica. Por exemplo, a relação “é um” pode ser representada pela propriedade *subClassOf* no RDF, cuja semântica é claramente definida nas especificações do RDF. Mas, o RDF não trata de

todas as limitações de uma rede semântica, como a definição de conceitos. Estes são abordados pelo OWL, que também é um padrão W3C para definir vocabulários para grafos de conhecimento. Assim, a representação da informação é definida por uma série de regras para a representação de dados em triplas (DuCharme, 2013).

Uma tripla é estruturada em sujeito, predicado e objeto, conforme ilustrado na Figura 4. O sujeito e o objeto correspondem aos nós, e são relacionados pelo predicado. Essa relação é direcionada do sujeito para o objeto e é chamada em RDF de propriedade. Um objeto pode também ser um literal, definindo uma propriedade para um recurso. Cada recurso relacionado a sujeito, predicado ou objeto, pode ser representado por um URI (*Uniform Resource Identifier*). Um URI identifica unicamente um recurso definido como um objeto de uma ontologia. Este recurso pode ser um URL (*Uniform Resource Locator*) que representa uma forma de acessar o recurso na Web. Não é preciso que o URI seja representado por um endereço existente, pois, o mesmo pode ser um número ou uma sequência de caracteres (Sakr et al., 2018).

Figura 4 – Representação de uma tripla



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um grafo de conhecimento deve ser consistente, sendo importante considerar a sua eficiência, tolerância a falhas e escalabilidade. Muitos desses aspectos estão relacionados às ontologias empregadas. No paradigma de dados vinculados, os grafos podem ser vinculados por meio de mapeamentos, incluindo mapeamento em nível de esquema e de instância.

4.3 Anotação Semântica de Dados

Conforme descrito na seção anterior, os grafos de conhecimento integram dados, instanciados a partir dos conceitos e suas relações em uma ou mais ontologias. Relacionar e integrar dados são essenciais para que os usuários descubram novas correlações e criem novos conhecimentos em aplicativos baseados em dados. As tecnologias semânticas facilitam a conexão de conjuntos de dados heterogêneos sem coordenação avançada entre produtores e consumidores de dados. Existem iniciativas, envolvendo dados governamentais para promover a interligação, utilizando tecnologias semânticas (Ding et al., 2011). Para isso, a

utilização de um fluxo de trabalho é importante para converter e utilizar os conjuntos de dados (Ding et al., 2011; Jeremy Tandy et al., 2015), obedecendo uma sequência de etapas:

- Inicializar: dado um conjunto de dados, determinar as identificações da fonte e os URIs dos dados brutos.
- Recuperar: criar uma versão do conjunto de dados para construir um instantâneo de arquivo.
- Converter: converter dados tabulares em arquivos RDF.
- Aprimorar: opcionalmente, usar configurações de conversão de aprimoramento fornecidas pelo usuário para gerar camadas de conversão adicionais.
- Carregar: inserir os conjuntos de dados distribuídos em terminais para integração.

O uso de dicionários de dados para registrar descrições sobre conjuntos de dados e seus elementos é amplamente adotado pelas instituições com a intenção de ajudar na reutilização. Os dicionários de dados contêm informações estruturais que são úteis para a redução da ambiguidade de interpretação pelos consumidores. Porém, estes dicionários não apresentam representação semântica dos dados, tornando difícil a sua interpretação por máquina. O uso de Dicionário Semântico de Dados (SDD - *Semantic Data Dictionary*) é uma alternativa para representar metadados legíveis por máquina para um conjunto de dados. O SDD compreende em especificações que formalizam a atribuição de uma representação semântica aos dados, anotando as colunas destes conjuntos e seus valores usando conceitos de vocabulários e ontologias de práticas recomendadas. Os objetos e seus atributos são representados e identificados por meio de URIs de ontologias relevantes que representam essas informações de uma maneira formalmente precisa e legível por máquina. A interpretação de SDDs gera triplas RDF que compõem um grafo de conhecimento e promove interconexão de dados abertos e outras triplas RDF (Rashid et al., 2020).

Diante das opções para conversão de dados tabulares para RDF (Ding et al., 2011; Jeremy Tandy et al., 2015; Rashid et al., 2020), destaca-se a ferramenta `sdd2rdf`⁵ que permite a inserção de conceitos implícitos e apresenta um nível abstrato para simplificar o mapeamento. A anotação semântica das colunas dos dados é realizada em um arquivo tabulado para mapeamento do dicionário (DM - *Dictionary Mapping*), onde cada linha mapeia uma coluna e explicita as relações entre os dados. As ontologias são utilizadas para formalizar os conceitos do mapeamento. Os metadados de descrição do SDD são organizados em um arquivo de configuração e existe a opção de registrar os dados categóricos de um conjunto de dados, mapeando para conceitos de uma ontologia (Rashid et al., 2020).

⁵ <https://github.com/tetherless-world/SemanticDataDictionary>

4.4 Geração de Inferências

As tecnologias da Web Semântica fornecem um ambiente de modelagem que pode lidar com dados heterogêneos, suportando interoperabilidade em diversos domínios de conhecimento, integração de dados distribuídos e emprego de motores de raciocínio para inferir novos conhecimentos automaticamente (Terkaj & Sojic, 2015).

A integração de diferentes conjuntos de dados em RDF é facilitada se as triplas de diferentes fontes fizerem referência a qualquer um dos mesmos vocabulários (*namespaces*), pois, é possível encontrar conexões entre os dados para gerar novo conhecimento, com a utilização de mecanismos de inferência. Os princípios de dados vinculados e os padrões relacionados facilitam o compartilhamento de dados, e o uso de URIs fornece o contexto de um termo para este propósito. Os vocabulários RDFS e OWL possibilitam definir e descrever classes e propriedades de maneira a permitir que determinados aplicativos deduzam novas informações do seu conjunto de dados. As próprias instruções RDFS e OWL são expressas usando triplas, para que seja possível consultá-las (DuCharme, 2013).

4.4.1 Inferências em OWL

Editores de ontologias apoiam a tarefa de elaboração de ontologias. O Protégé⁶ é um exemplo deste tipo de ferramenta e também fornece recursos para a realização de inferências. Ele é um ambiente extensível e multiplataforma, desenvolvido na *Stanford University*. Além de ser um editor de ontologias, esta ferramenta contém uma biblioteca de módulos que podem ser instalados (*plug-ins*) para adicionar mais funções ao ambiente. As principais funções do Protégé são: carregar e salvar ontologias OWL e RDF; editar e visualizar classes, propriedades e regras SWRL; definir características lógicas de classe como expressões OWL; executar raciocinadores (*reasoners*) para inferências, como classificadores de lógica de descrição; e editar indivíduos OWL para marcação da Web Semântica.

Diante do objetivo de aplicar inferências para apoiar a tomada de decisões, considera-se esta ferramenta como uma opção para este propósito. Os raciocinadores adicionados a esta ferramenta permitem realizar inferências tomando como base as especificações na ontologia criada. Um exemplo sobre esta prática envolve a implementação da relação entre espaços de uma edificação. Primeiramente, uma tripla é criada para especificar uma propriedade *sebm:hasIntersection* como uma *owl:SymmetricProperty* e outra

⁶ <https://protege.stanford.edu/>

tripla para informar que a Escada tem esta relação com a instância Andar01. Um aplicativo que entenda sobre a relação simétrica, como o Protégé, identificará que Andar01 tem a relação com Escada. Assim, conforme apresentado na Figura 5, um raciocinador, como o *Pellet*, adiciona a nova tripla inferida sobre os dados para melhor desempenho nas consultas.

Figura 5 – Inferência de simetria realizado no Protégé com o raciocinador Pellet.

The image displays two panels from the Protégé ontology editor. The top panel, titled 'Description: Escada', shows a 'Types' section with 'Zone' and a 'Property assertions: Escada' section with three 'hasIntercection' assertions for 'Andar0', 'Andar1', and 'Andar2'. The bottom panel, titled 'Description: Andar0', shows a 'Types' section with 'Floor' and a 'Property assertions: Andar0' section with five assertions: 'hasSpace' for 'Patio', and 'hasZone' for 'EspacoVegetacao', 'Bicicletario', 'Patio', and 'Estacionamento'. The 'hasZone' assertions are highlighted in yellow.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização de regras SWRL, associada ao uso de raciocinadores no Protégé, permite a implementação de inferências. Dependendo da inferência, a decidibilidade pode ser realizada em termos do T-Box (caixa de conceitos ou terminologia) ou do A-Box (indivíduos ou fatos) de uma determinada ontologia. Em termos do T-Box, a segurança da DL impõe uma limitação de que somente as classes ou termos definidos anteriormente na ontologia podem ser usados nas regras do SWRL. Isso significa que nenhum indivíduo novo ou desconhecido pode ser adicionado à caixa de terminologia. Em relação ao A-Box, a segurança da DL determina que as variáveis usadas na regra consequente também devem existir em seu antecedente, isto é, nenhum indivíduo anônimo ou isolado pode ser introduzido no A-Box da ontologia (Lawan & Rakib, 2019).

A decidibilidade pode ser recuperada restringindo a forma de regras admissíveis, impondo uma condição de segurança adequada. O SWRL é uma opção para o desenvolvimento de regras e aplicações baseadas em ontologias quando apoiado pelo editor de ontologia Protégé, bem como por mecanismos de regras populares e raciocinadores de ontologia, como *Jess*, *Drools* e *Pellet* (Bassiliades, 2018). Aplicado ao contexto da construção civil, inferências sobre os dados espaciais, materiais empregados e demais informações sobre o projeto podem proporcionar conhecimento sobre aspectos sustentáveis de um ambiente construído. A regra (2) exemplifica uma inferência sobre a verificação do percentual mínimo de área verde de uma edificação para obtenção de uma pontuação para certificação LEED.

O cálculo para obter o percentual mínimo é realizado a partir da área verde (?a), dividida pelo total (?t) da construção (?x). Caso o antecedente seja verdadeiro, isto é, o percentual seja maior que 30%, uma tripla para a pontuação é criada.

$$\begin{aligned} & \text{sebim:ifcBuilding}(?x) \wedge \text{sebim:ifcSpace}(?y) \wedge \text{sebim:ifcAreaStyle}(?z) \wedge \text{sebim:ifchasSpace}(?x, ?y) \quad (2) \\ & \wedge \text{sebim:ifchasAreaStyle}(?y, ?z) \wedge \text{sebim:ifcArea}(?y, ?a) \wedge \text{sebim:ifcArea}(?x, ?t) \wedge \\ & \text{swrlb:divide}(?c, ?a, ?t) \wedge \text{swrlb:greaterThanOrEqual}(?c, 0.3) \rightarrow \text{sebim:score}(?x, 1) \end{aligned}$$

A expressão apresentada utiliza recursos das principais bibliotecas internas do SWRL para operações comuns que envolvem restrições, listas, *string*, comparação, operações booleanas, URIs e data/hora. Além disso, os *built-ins* do SWRL são especialmente úteis, pois permitem uma definição especial de domínios específicos, métodos arbitrários chamados “*built-ins* definidos pelo usuário” - um recurso importante do formalismo do SWRL que permite aos usuários definir novas bibliotecas internas para tarefas especiais. As principais funções incorporadas, como os operadores matemáticos, e as operações de *string* e data foram definidas na especificação SWRL original (Horrocks et al., 2004). O Protégé permite a implementação através do *plug-in* SWRLTab, onde as regras são agrupadas com a ontologia em um único arquivo OWL, que pode ser importado para qualquer ontologia de domínio.

Conforme as limitações apresentadas na utilização de regras em SWRL, destaca-se a possibilidade de realização de inferências em grafos RDF.

4.4.2 Inferências em RDF

Diante da utilização de grafos de conhecimento, destaca-se a possibilidade de consultas sobre o conhecimento implícito e inferido. Dentro desse contexto, (COPPENS et al., 2013) propõem uma extensão à linguagem de consulta SPARQL (*SPARQL Protocol and RDF Query Language*) para suportar o raciocínio remoto, no qual o consumidor de dados pode definir as regras de inferência. São aplicados os regimes de vinculação suportados por um provedor de terminal SPARQL com uma etapa de raciocínio adicional usando as regras de inferência definidas pelo consumidor de dados. Ao mesmo tempo, esta solução oferece possibilidades para resolver problemas de interoperabilidade ao consultar pontos de extremidade SPARQL remotos, que podem suportar estruturas de consulta federada. Essas estruturas podem ser estendidas para fornecer um raciocínio remoto e distribuído (Coppens et al., 2013).

O SPARQL é uma linguagem de consulta genérica que permite consultas federadas entre fontes de dados heterogêneas e vinculadas (Gearon et al., 2013). Em

comparação com as linguagens de consulta específicas, o SPARQL é especialmente aplicável a cenários em que são necessários dados de várias fontes (Krijnen & Beetz, 2018).

As triplas recuperadas em uma consulta SPARQL apresentam semelhanças com o raciocínio, uma vez que é necessária a presença de todo o conjunto de triplas, com a exploração da definição das condições e da execução de filtros, para tornar a operação precisa e para retornar um subconjunto, que são as triplas inferidas. O principal mecanismo para computar os resultados da consulta no SPARQL é a correspondência de grafos que também é chamada de vinculação simples. As triplas RDF nos dados consultados e no padrão de consulta são interpretados como nós e arestas dos grafos direcionados, e o grafo da consulta resultante corresponde ao grafo de dados gerado a partir das variáveis. Padrões do W3C, incluindo RDF e OWL, fornecem interpretações semânticas para grafos RDF que permitem inferir instruções RDF adicionais de afirmações explicitamente dadas. Muitos aplicativos que dependem dessas semânticas requerem uma linguagem de consulta como SPARQL, mas, para usar o SPARQL, a correspondência básica deve ser definida usando relações semânticas de vinculação, em vez de estruturas criadas explicitamente. Existem diferentes maneiras possíveis de definir uma extensão básica de correspondência de padrão de grafo para uma relação de vinculação (Coppens et al., 2013). (Hawke et al., 2013) especificam regimes de vinculação para definir não apenas a relação de vinculação a ser usada, mas também quais consultas e grafos são bem formados para o regime, uma vez que existem diferentes maneiras significativas para usar a mesma relação de vinculação. Desta forma, é possível definir uma solução em que o usuário final defina a ontologia ou o conjunto de regras usado para raciocinar sobre o grafo. O raciocínio acontece após a correspondência básica dos padrões de grafos, para ter uma etapa de pós-raciocínio, que complementa a etapa de pré-raciocínio oferecida pelo regime de vinculação (Hawke et al., 2013).

Como uma linguagem para consultar dados RDF, o SPARQL não contém vocabulários ou funções específicas para atender a todos os requisitos no domínio da construção. Ao usar apenas SPARQL padrão, muitos relacionamentos e propriedades úteis, como relações espaciais, explicitamente ou implicitamente definidas nos modelos são difíceis de serem recuperadas (C. Zhang & Beetz, 2016). Consultas padrões para obter listagens, comparações de materiais e demais itens do projeto de um ambiente construído são realizadas por SPARQL padrão. Como exemplo, tem-se a consulta (3) que retorna dados de medição de um equipamento.

```

SELECT ?name ?elemento ?temp
WHERE {
  ?name rdf:type owl:NamedIndividual.
  ?name bim:hasElement ?elemento.
  ?elemento bim:Measure ?temp.
}

```

(3)

```
}
ORDER BY ?name
```

O SPARQL oferece a função INSERT que insere um grafo especificado ou triplas no banco de dados. O recurso CONSTRUCT também pode ser utilizado para inferir e validar dados RDF, pois apresenta o resultado da consulta estruturado em RDF. Estes recursos permitem que o resultado de complexas consultas seja registrado no conjunto de dados para geração de novos conhecimentos. Regras lógicas podem ser convertidas para permitir a centralização das inferências e facilitar a manutenção de sistemas de apoio à tomada de decisão (C. Zhang & Beetz, 2016). Como exemplo desta aplicação, toma-se como base a consulta (3). As triplas retornadas nesta consulta são inseridas no conjunto de dados, conforme apresentado na consulta (4).

```
INSERT {?name ?elemento ?temp}
WHERE {
?name rdf:type owl:NamedIndividual.
?name bim:hasElement ?elemento.
?elemento bim:Measure ?temp.
}
ORDER BY ?name
```

(4)

Baseado na aceitação generalizada da linguagem de consulta do SPARQL, o SPIN⁷ (*SPARQL Inferencing Notation*) se tornou um padrão para representar regras e restrições do SPARQL nos modelos da Web Semântica. As regras SPIN podem ser executadas diretamente nos bancos de dados e nenhum mecanismo intermediário com sobrecarga de comunicação precisa ser introduzido. Além disso, o SPIN é mais expressivo que o SWRL, pois o SPARQL possui vários recursos, como expressões UNIONS e FILTER. O SPIN tem um modelo orientado a objetos que proporciona melhores modelos de manutenção do que as listas de regras simples do SWRL. Assim, o SPIN vai muito além de ser apenas uma linguagem de regras e fornece meios para expressar restrições e definir novas funções e modelos (Bassiliades, 2018). Na Tabela 4 demonstra-se um comparativo com o SWRL.

A partir desta especificação, existe um conjunto de ferramentas que inclui uma implementação SPIN como opção para realização de inferências. Soluções para análise autônoma para certificação da edificação ou autorização para construção necessitam de um grande conjunto de dados. Dependendo dessa necessidade, um ambiente distribuído pode ser uma solução de estrutura para o raciocínio de grandes conjuntos. (Coppens et al., 2013) propõem uma estrutura na qual o raciocínio ocorre com várias ontologias inter-relacionadas

⁷ <https://spinrdf.org/>

com mapeamentos semânticos em dados distribuídos e a inferência é alcançada através da distribuição de problemas entre recursos de computação heterogêneos.

Tabela 4 – Correspondências entre SWRL e SPIN

SWRL	SPIN
swrl:Imp	sp:Construct
swrl:head	sp:templates
swrl:body	sp:where
swrl:ClassAtom swrl:classPredicate <Class> swrl:argument1 <Arg>	sp:subject <Arg> sp:predicate rdf:type sp:object <Class>
swrl:IndividualPropertyAtom swrl:propertyPredicate <Prop> swrl:argument1 <Arg1> swrl:argument2 <Arg2>	sp:subject <Arg1> sp:predicate <Prop> sp:object <Arg2>
swrl:SameIndividualAtom swrl:argument1 <Arg1> swrl:argument2 <Arg2>	sp:subject <Arg1> sp:predicate owl:sameAs sp:object <Arg2>
swrl:DifferentIndividualsAtom swrl:argument1 <Arg1> swrl:argument2 <Arg2>	sp:subject <Arg1> sp:predicate owl:differentFrom sp:object <Arg2>
swrl:DatavaluedPropertyAtom swrl:propertyPredicate <Prop> swrl:argument1 <Arg1> swrl:argument2 <Arg2>	sp:subject <Arg1> sp:predicate <Prop> sp:object <Arg2>
swrl:BuiltinAtom swrl:builtin <Fun> swrl:arguments <Args>	Customized translation
swrl:Variable <Var>	sp:varName "<Var>"
<Value> ^ <DataType>	<Value> ^ <DataType>
<Individual>	<Individual>

Fonte: (Bassiliades, 2018)

A aplicação destas tecnologias semânticas exige o entendimento do domínio e o mapeamento das necessidades para que o resultado seja satisfatório. O processo de elaboração de ontologias, conciliado à anotação semântica de dados, promoverá a integração dos diferentes conjuntos de dados. Conciliado a isso, a aplicação de consultas e inferências proverá novos conhecimentos aos consumidores destes dados.

5 METODOLOGIA

5.1 *Design Science* como metodologia de pesquisa

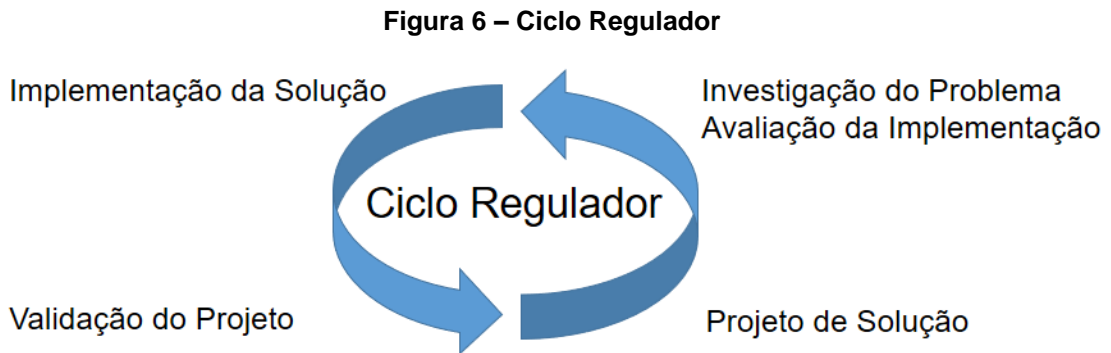
O arcabouço, elaborado nesta pesquisa, para automatizar a avaliação para certificação LEED pode ser considerado um tipo de artefato. Segundo (SIMON, 1996), um artefato é um ponto de encontro entre o ambiente interno e o ambiente externo, que seriam as condições em que o artefato deve funcionar. Artefatos podem ser modelos, arcabouços, construtos, métodos, instâncias ou sistemas de informações. O artefato é a organização dos elementos do ambiente interno para atingir objetivos em um determinado ambiente externo (Dresch et al., 2015). Assim, no contexto desta pesquisa, o projeto de construção civil é o ambiente interno e os critérios da certificação LEED são os objetivos do ambiente externo a serem atingidos.

A metodologia *Design Science* (DS) é empregada em pesquisas com a elaboração de artefatos para que contribuam em novos conhecimentos com a adoção de rigor e relevância. Pesquisas que buscam a resolução de problemas, conforme este paradigma tecnológico em Ciência da Informação, são sustentadas por esta metodologia, uma vez que as ciências tradicionais têm como objetivos centrais a exploração, descrição, explicação e predição. A dificuldade está na demonstração da geração de novo conhecimento, e não apenas em elaborar um artefato usando apenas conhecimentos e tecnologias existentes (Bax, 2013).

Bax (2013) destaca que essa dificuldade gera a visão comum e recorrente de que um projeto de elaboração de um sistema de informação ou de outro artefato tecnológico qualquer, dificilmente poderá caracterizar pesquisa científica. Apesar de não haver esse consenso na definição do que seria a própria DS, esta metodologia tem sido vista por alguns autores como uma metodologia adequada à condução de pesquisas em informação, tecnologia, engenharia e gestão com relevância e rigor científico (Dresch et al., 2015).

A DS é fundamentalmente um paradigma de solução de problemas. Essa metodologia apoia a busca através de inovações que definam as ideias, práticas, capacidades técnicas e produtos por meio dos quais a análise, o projeto, a implementação e o uso de sistemas de informação podem ser realizados de forma eficaz e eficiente. Para a condução de pesquisas com este cunho tecnológico, tem-se o método *Design Science Research* (DSR) que, quando bem aplicado, produz rigor científico efetivo. Uma característica da pesquisa que utiliza a DSR como método é ser orientada à solução de problemas específicos, não necessariamente buscando a solução ótima, mas a solução satisfatória para a situação (Hevner & Chatterjee, 2010).

Para a condução desta pesquisa, o problema prático é decomposto em um conjunto de problemas aninhados, que se dividem em problemas práticos e problemas teóricos. Para a solução do problema apresentado na introdução desta tese foi utilizado o ciclo regulador baseado em Wieringa (2009), apresentado na Figura 6, que consiste em uma estrutura lógica com diretrizes úteis para a resolução de problemas.



Fonte: Wieringa (2009).

Problemas práticos são destinados à solução de um problema do mundo, ou seja, necessariamente o mundo deve ser mudado e o conhecimento é adquirido a partir dessa mudança. As soluções desses problemas envolvem a investigação dos objetivos, o alcance de metas estipuladas e a avaliação das soluções pelos interessados, que no caso desta pesquisa são arquitetos, engenheiros e empresários da construção civil. Problemas teóricos, por sua vez, são problemas que não demandam uma mudança no mundo, mas a mudança no conhecimento sobre o mundo. São proposições enunciadas e verificadas como verdadeiras ou falsas para geração de conhecimento. Assim, os problemas práticos alteram o estado do mundo e obtêm conhecimento com a mudança, e os problemas teóricos modificam o estado do conhecimento e o aplica no mundo real para validar a alteração (Wieringa, 2009).

Cada etapa do ciclo regulador auxilia na condução da prática das pesquisas, através de um problema prático, ou na geração de novos conhecimentos através de respostas aos problemas teóricos.

A primeira etapa orienta sobre a investigação do problema teórico para buscar um melhor entendimento do problema. Trata-se de identificar os critérios para solução pelos especialistas, descrevendo e procurando prever uma situação sem solução.

A etapa sobre projeto de soluções tem-se um problema prático para melhorar o estado do mundo, conforme o objetivo do projeto. Como trata-se de um ciclo, a solução não é totalmente projetada nessa etapa, sendo que parte da solução é encontrada ou construída nas fases de validação e implementação.

A etapa seguinte corresponde à validação do projeto, que consiste em verificar o atendimento aos objetivos do público alvo. Esta etapa deve responder à problemas teóricos sobre a validade interna (a solução satisfaz aos critérios identificados?), os compromissos (outras soluções atenderiam esses critérios?), e a validade externa (esta solução pode ser generalizada para atender outros contextos?).

A próxima etapa é a implementação, que se trata da execução do planejamento realizado nas etapas anteriores. Por fim, é preciso retornar à primeira etapa do ciclo, para avaliar os resultados e definir sobre a realização de um novo ciclo.

Pesquisas realizadas a partir da DS devem buscar rigor e relevância, que são características indispensáveis a qualquer pesquisa científica. A relevância corresponde à utilização dos artefatos na pesquisa, e o rigor à validação e à obtenção da confiabilidade dos resultados, que aumentam a base de conhecimento em uma determinada área (Hevner, 2007). É possível observar que o ciclo regulador auxilia nesta busca, distinguindo e relacionando os problemas práticos e teóricos. Além disso, a validação através da tentativa de generalização de soluções é um importante ponto. Este conceito, também conhecido como “classe de problemas”, corresponde à organização de um conjunto de problemas com artefatos que orienta a trajetória do desenvolvimento do conhecimento no âmbito da DS (Dresch et al., 2015).

5.2 Metodologias complementares

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, estruturada metodologicamente, foram realizadas outras escolhas e definições a serem usadas com o método DSR. Esses complementos metodológicos correspondem à necessidade de um pensamento transdisciplinar para a solução de problemas reais (Dresch et al., 2015). Assim, conforme o paradigma das ciências naturais, é possível classificar esta pesquisa como exploratória, qualitativa e explicativa.

Uma pesquisa exploratória tem como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores (Gil, 2008). Os estudos posteriores, conforme a DSR, seriam os subproblemas posteriores, dentro da sequência definida pela estrutura aninhada do problema, que utilizam os resultados dos subproblemas anteriores como entrada para se atingir a sua própria solução. Além disso, por proporcionar maiores informações sobre a representação e organização de informações através de ontologias aplicadas a dados no contexto BIM e dados externos, esta pesquisa apresenta o carácter exploratório.

O paradigma qualitativo justifica-se como o mais condizente para o alcance dos objetivos da presente pesquisa, por tratar de um estudo sobre metodologias para construção e integração de ontologias, bem como sobre a aplicação de inferências para geração de novos conhecimentos. Essa investigação exige uma postura crítica do pesquisador para a percepção e assimilação das soluções desenvolvidas para o problema de pesquisa. As informações obtidas são analisadas dedutivamente para determinar as evidências para apoiar cada área ou para realizar novas iterações para coletar novas informações (Creswell, 2014).

A classificação desta pesquisa como explicativa deve-se à atuação na implementação de uma integração semântica de dados interpretando, registrando e analisando dados BIM com dados abertos e dados para certificação LEED. As pesquisas explicativas nas ciências naturais valem-se quase que exclusivamente do método experimental. Uma vez determinado o problema de pesquisa, as soluções são selecionadas e as formas de controle e observação são definidas para avaliar os resultados (Gil, 2008; Marconi & Lakatos, 2003).

Por envolver a elaboração de uma ontologia de domínio, destaca-se o embasamento ao método 101 (Noy & McGuinness, 2001). Este é um método simples, baseado na experiência de desenvolvimento com o *software* Protégé, e útil na explicação de passos mais específicos na construção de ontologias, como a definição de propriedades das classes e relações, criação de restrições de dados, de cardinalidade e de instâncias, entre outros.

A Abordagem Sistemática para a Construção de Ontologias (SABiO) também é considerada no desenvolvimento da ontologia simplificada desta pesquisa. Essa abordagem foca na criação de ontologias de domínio e também propõe processos de suporte. A SABiO distingue entre ontologias de referência e operacionais, fornecendo atividades que se aplicam ao desenvolvimento de ambos os tipos de ontologias de domínio. O processo para o desenvolvimento de ontologias é apoiado nas etapas de Aquisição de Conhecimento, Documentação, Gerência de Configuração, Avaliação e Reutilização. Além das orientações quanto ao processo, o autor recomenda que uma ontologia de domínio seja construída com base em uma ontologia de fundamentação (Falbo, 2014).

Ontologia de referência de domínio significa uma ontologia principal que é construída com o objetivo de tornar a melhor descrição possível do domínio. É uma especificação independente de solução (modelo conceitual) com a finalidade de tornar clara e precisa a descrição de domínios para os objetivos de comunicação, aprendizagem e solução de problemas com a versão de domínio projetada. Assim, antes de implementar uma ontologia, uma fase de desenho deve ser realizada levando em consideração os requisitos tecnológicos não funcionais e o ambiente de implementação da ontologia.

5.3 Estruturação desta pesquisa

Conforme apresentado acima, esta pesquisa foi conduzida pelo método DSR de Wieringa (2009), que define a estrutura aninhada do problema. A estrutura desta pesquisa, exibida no Quadro 1, contém a decomposição do problema da pesquisa em problemas práticos (P) e teóricos (K), mutuamente aninhados. Dessa forma, os problemas e subproblemas ficam acomodados nessa estrutura em tipos específicos, de maneira a facilitar a distinção do foco teórico ou prático, de forma explícita.

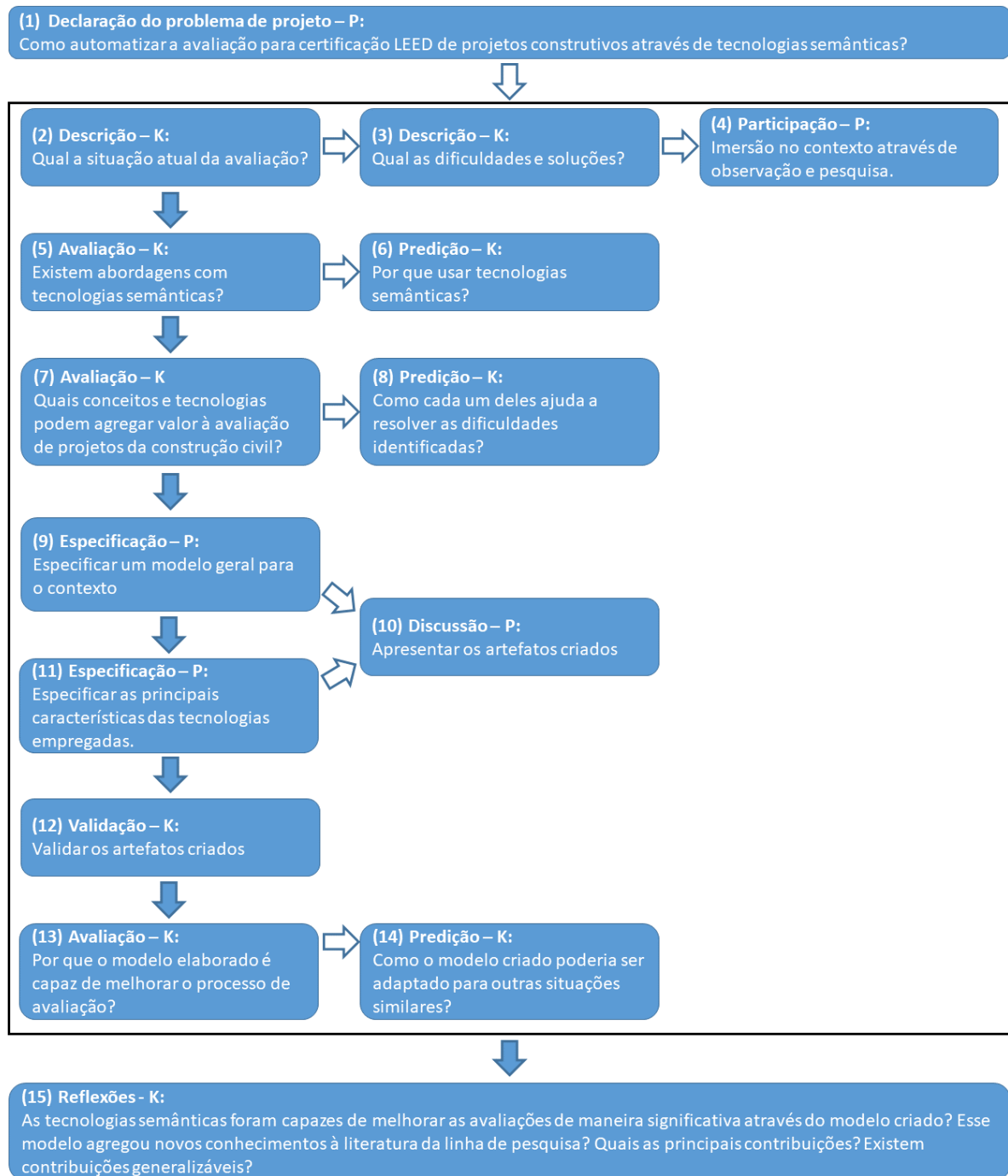
As partes prática e teórica foram delineadas para facilitar a identificação de possíveis generalizações e de contribuições de conhecimento. Os problemas práticos (P) e teóricos (K) são classificados em subtipos através dos termos:

- Descrição (K): envolve os problemas de conhecimento para descobrir uma necessidade de investigação e identificar as suas causas;
- Avaliação (K): permite que os fatos sejam observados e diagnosticados;
- Predição (K): realiza a predição dos efeitos de uma solução;
- Validação (K): valida as soluções e compara com os critérios;
- Especificação (P): especifica e desenvolve uma solução proposta;
- Participação (P): realiza ações participativas para buscar e apresentar as soluções;
- Discussão (P): apresenta os artefatos, a participação e a discussão dos envolvidos;
- Reflexões (K): agrega várias questões para geração de conhecimento.

Cada caixa contém um tipo de problema numerado para facilitar a referência. As setas sem preenchimento correspondem à decomposição de um problema em subproblemas, e as setas preenchidas denotam sequência temporal para se atingir o objetivo geral. Além disso, como o modelo é cíclico, a partir do problema 15, volta-se para o 1, que trata do problema central desta pesquisa. O problema central (Como automatizar a avaliação para certificação LEED de projetos construtivos através de tecnologias semânticas?) é decomposto em todos os subproblemas de 2 a 15.

Os subproblemas 2 e 3 correspondem ao levantamento do contexto atual da avaliação para certificação LEED de projetos de construção civil. As soluções desses subproblemas são descrições, obtidas através da revisão de literatura e observação, conforme decomposição para o subproblema prático 4.

Quadro 1 – Estrutura aninhada do problema



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Wieringa (2009).

Após essa descrição inicial do contexto, é possível responder ao subproblema teórico 5 que propõe avaliar a aplicação de tecnologias semânticas e prever (subproblema teórico 6) quais as possíveis vantagens da sua utilização.

Na sequência, tem-se outro ciclo teórico de avaliação e predição, com os subproblemas 7 e 8: avaliar quais conceitos e tecnologias poderiam agregar à avaliação de

projetos construtivos e predizer quais seriam os seus efeitos nas soluções das dificuldades encontradas na solução do subproblema 3.

A partir destes subproblemas, inicia-se um ciclo prático com os subproblemas 9, 10 e 11 para especificação e discussão de um modelo geral com a aplicação de tecnologias semânticas para automatizar a certificação LEED.

A discussão no subproblema 10 é alcançada através da experimentação do artefato em projetos de ambientes construídos para obter novas informações que proporcionem a melhoria desse modelo para atendimento aos critérios da certificação.

Respondidas estas questões, o artefato é validado conforme os subproblemas 12 e 13. No subproblema 12 os artefatos são validados de acordo com o referencial teórico e no subproblema 13 a validação ocorre por meio da análise do atendimento aos critérios de solução estabelecidos para a melhoria das avaliações. Além destes, uma predição será realizada, conforme o subproblema 14, para adaptação do modelo elaborado para atender a situações similares.

Por fim, o subproblema 15 corresponde à extração do conhecimento gerado na criação do artefato e na solução do problema principal. Esta questão deve conter as reflexões sintetizadas de toda a solução.

A decomposição da questão de projeto em subproblemas favorece à reflexão sobre os objetivos específicos da pesquisa e estabelece uma estrutura lógica a ser seguida no desenvolvimento do trabalho, com a segurança de abordar os problemas de acordo com suas respectivas naturezas.

Assim como foi feito no final do Capítulo 1, onde foi dada uma visão geral da estrutura deste trabalho com o conteúdo de cada um de seus capítulos, torna-se interessante também a apresentação de quais capítulos ou seções da tese abordam cada um dos subproblemas do Quadro 1.

Isso pode ser visto na Tabela 5, que apresenta também o número de cada subproblema juntamente com o seu enunciado, sua natureza, ou seja, se é um problema prático (P) ou teórico (K) e os capítulos que o abordam.

Tabela 5 – Subproblemas e respectivos capítulos

Subproblema	Natureza	Capítulos
Qual a situação atual da avaliação para certificação LEED?	K	1
Qual as dificuldades e soluções?	K	1
Imersão no contexto através de observação e pesquisa.	P	2 e 3
Existem abordagens com tecnologias semânticas?	K	4
Por que usar tecnologias semânticas?	K	4
Quais conceitos e tecnologias podem agregar valor à avaliação de projetos da construção civil?	K	2, 3 e 4

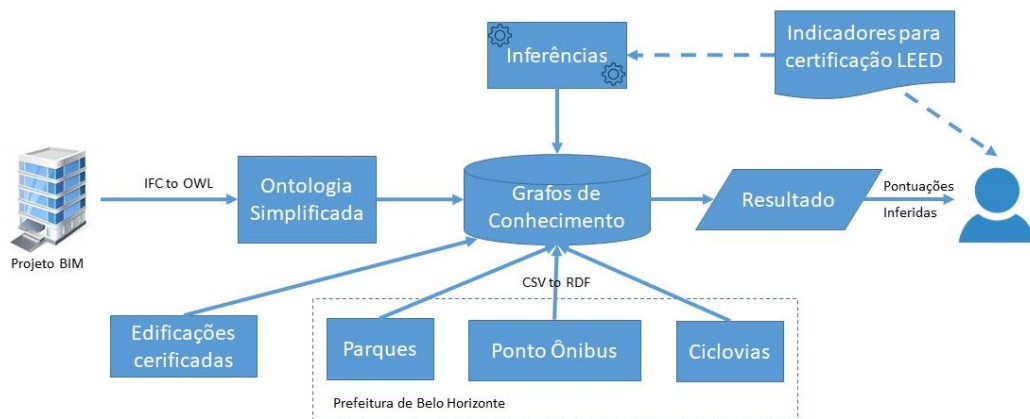
Como cada um deles ajuda a resolver as dificuldades identificadas?	K	6
Especificar um modelo geral para o contexto.	P	6
Apresentar os artefatos criados.	P	6
Especificar as principais características das tecnologias empregadas.	P	6
Validar os artefatos criados.	K	7
Por que o modelo elaborado é capaz de melhorar o processo de avaliação?	K	7
Como o modelo criado poderia ser adaptado para outras situações similares?	K	7
As tecnologias semânticas foram capazes de melhorar as avaliações de maneira significativa através do modelo criado? Esse modelo agregou novos conhecimentos à literatura da linha de pesquisa? Quais as principais contribuições? Existem contribuições generalizáveis?	K	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

6 INTEGRAÇÃO SEMÂNTICA PARA CERTIFICAÇÃO

O processo para o desenvolvimento do artefato⁸ desta pesquisa, apresentado na Figura 7, se inicia com a obtenção do arquivo no formato IFC de um projeto desenvolvido na tecnologia BIM. Este formato é convertido em uma ontologia que contempla classes para os critérios da avaliação LEED (USGBC, 2020). **A ontologia simplificada foi modelada apoiada na ontologia ifcOWL⁹ e fundamentada em UFO.** Para a integração de dados externos ao projeto de construção civil, dados abertos sobre o entorno e meios de transporte são obtidos no site da prefeitura de Belo Horizonte¹⁰ e no site da organização que mantém a certificação LEED¹¹. Estes conjuntos de dados, em formato CSV (*Comma-separated values*), são mapeados em ontologias e convertidos em grafos RDF, utilizando a ferramenta *sdd2rdf*. Os grafos RDF são inseridos no *triplestore* Parliament¹² para realização das consultas e inferências em SPARQL. Por fim, uma consulta é executada para apresentação do resultado das inferências sobre as pontuações obtidas.

Figura 7 – Processo de construção do artefato



Fonte: Elaborador pelo autor.

Este processo exige o conhecimento de tecnologias e, ainda, pode ser considerado complexo para o uso de um especialista em certificação. Essa implementação de um sistema baseado em regras se baseia na validação do problema desta pesquisa, com os devidos cuidados para que seja expandida em outras soluções. A construção do artefato,

⁸ <https://github.com/cgtsbr/sebim>

⁹ <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-formats/ifcowl/>

¹⁰ <http://bhmap.pbh.gov.br/>

¹¹ <https://www.gbcbrasil.org.br/certificacoes/>

¹² <https://github.com/SemWebCentral/parliament>

abrange as etapas de elicitación de requisitos da ontologia, seleção das ontologias a serem integradas, integração da ontologia e avaliação da ontologia resultante (Falbo, 2014).

Conforme abordado no Capítulo 3, a ontologia ifcOWL não simplifica a utilização de modelos IFC. Mesmo se tratando de uma ontologia, sua estrutura é quase idêntica ao esquema EXPRESS e dificulta a aplicação em casos práticos, no qual grafos RDF simples são desejáveis. Diante disso, optou-se pela implementação de uma ontologia simplificada para facilitar a extração de dados e a execução da experimentação.

A partir da validação da primeira versão da ontologia de domínio simplificada, uma nova ontologia foi desenvolvida com base na ontologia de fundamentação UFO. Conforme Falbo (2014), conceitos e relações em uma ontologia de domínio devem ser previamente analisados à luz de uma ontologia fundacional. A ideia por trás da análise ontológica é fornecer uma base sólida para os conceitos de modelagem, assumindo que tais conceitos visam representar a realidade.

6.1 Ontologia Simplificada

Conforme apresentado no Capítulo 3, o conhecimento para construção da ontologia foi obtido em fontes de conhecimento consolidado em padrões internacionais, desenvolvidos por grupos de especialistas. Os elementos da ontologia (conceitos, relações, propriedades e axiomas) foram implementados para responder às questões de competência, isto é, responder os critérios para certificação LEED (Tabela 2). Nesse sentido, adotou-se um processo iterativo e fortemente vinculado ao processo de avaliação da ontologia.

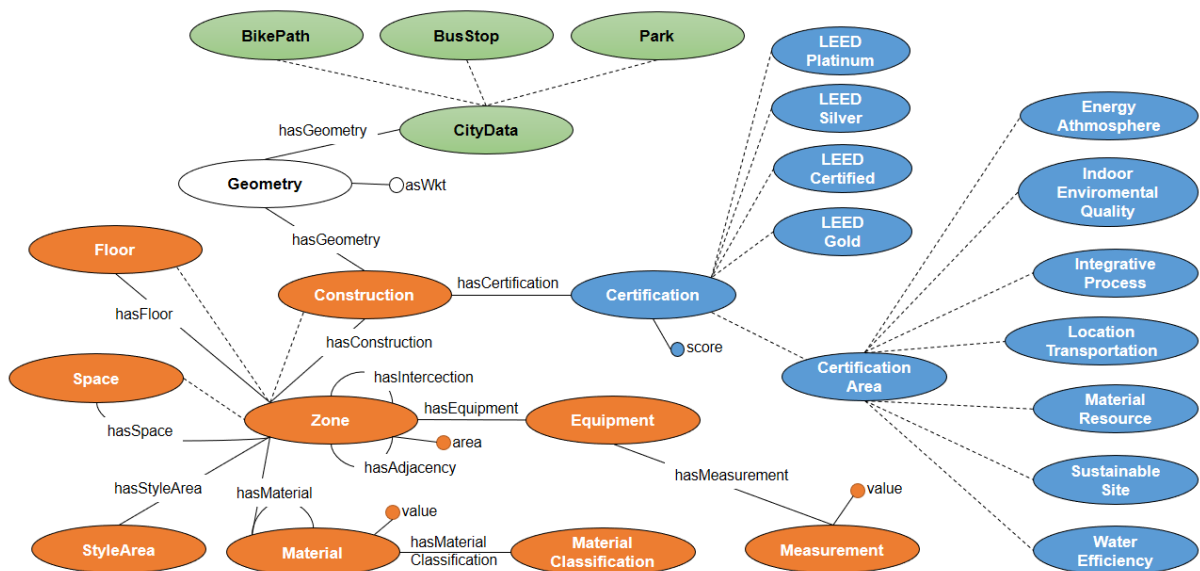
Com os dados de construção disponíveis em um grafo semântico, em uma base formal explícita, é possível reestruturar e simplificar para melhor correspondência aos diferentes requisitos associados a cenários práticos. Pauwels e Roxin (2016) investigaram propostas e abordagens tecnológicas para simplificar os dados de construção do ifcOWL, para atender a algumas necessidades específicas. Segundo os autores, as formas de implementação podem se basear em:

- Utilizar programação procedural para gerar qualquer tipo de simplificação;
- Elaborar ontologias BIM contendo apenas os principais componentes de um modelo de construção civil (paredes, espaços, elementos, pisos), podendo ser expandida conforme a aplicação;
- Realizar o processo de forma declarativa, através da base formal da linguagem OWL DL, aproveitando as vantagens das linguagens de consulta e regras com os dados RDF e ontologias OWL, como SPARQL e SWRL.

Independentemente da abordagem de implementação adotada, sugestões de simplificação relativamente diretas podem ser consideradas. A maioria está diretamente relacionada à presença de elementos e recursos do EXPRESS na ontologia ifcOWL. Uma sugestão é a remoção das informações numéricas de geometria dos ambientes, utilizadas em ferramentas de representação tridimensional. Além deste conjunto de dados, pode-se realizar outras remoções sobre os recursos de apresentação, definição de apresentação, aparência de apresentação, perfil, topologia, geometria, modelo geométrico e restrição geométrica. Outra sugestão de simplificação envolve separar classes em propriedades de tipo de dados explícitos como *strings*, inteiros e booleanos. A terceira sugestão de simplificação envolve a reescrita das propriedades vinculando diretamente a um elemento, pois, o ifcOWL utiliza relações intermediárias. Por fim, a última simplificação envolve a substituição das instâncias relacionais (subclasses de *IfcRelationship*), por propriedades diretas do elemento. Tais ações sugeridas reduzem significativamente a quantidade de triplas em relação ao ifcOWL (Pauwels & Roxin, 2016).

A ontologia simplificada SEBIM (*Semantic BIM*) foi criada no Protégé 5.5 contemplando os dados necessários para a análise dos critérios para certificação LEED. O seu processo de implementação seguiu a abordagem em utilizar os principais componentes, simplificando as propriedades e relacionamentos. Na Figura 8 são exibidas as classes e propriedades utilizadas para organizar as informações.

Figura 8 – SEBIM: Esquema de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

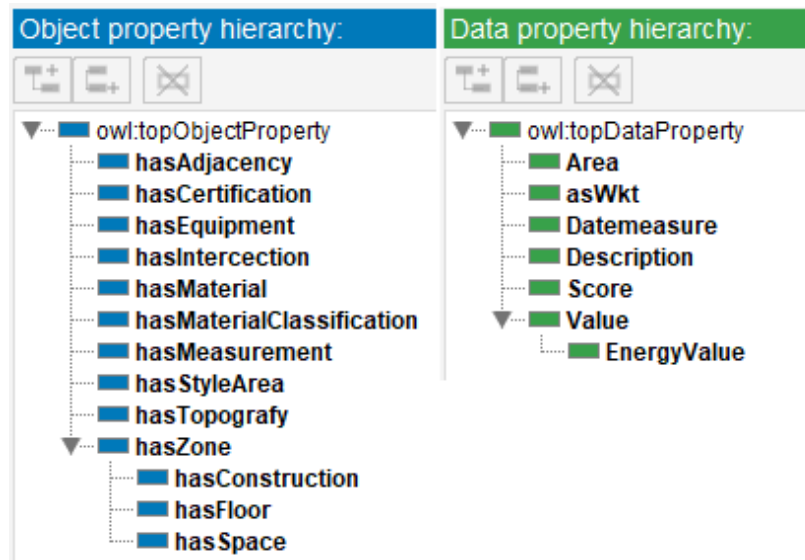
Os componentes do projeto de construção foram escolhidos para atender as análises dos critérios escolhidos para experimentações do protótipo. Por se tratar de uma

simplificação do formato IFC, novas classes podem ser incluídas de acordo com outras análises, seguindo o mesmo método. As áreas (zonas) do ambiente construído são divididas em subclasses Construção, Espaço e Andar. Estas zonas são relacionadas entre si através de propriedades de interseção, adjacência e abrangência. As áreas têm relação com uma classe Estilo e uma Zona pode ter equipamentos instalados.

Diante do objetivo de aplicar os critérios para avaliação, uma Construção se relaciona com a classe Certificação. Os critérios foram criados como subclasses para organizar os dados conforme o manual da certificação e registrar separadamente cada pontuação recebida. Não foram realizados relacionamentos entre os critérios e as classes de componentes de uma construção, uma vez que as inferências recuperam estas informações.

Como muitas análises envolvem a utilização de materiais e equipamentos, classes foram consideradas para abstrair e representar estes dados, bem como o relacionamento de inclusão em uma Zona. Os materiais também têm relação para a sua composição de matérias primas e para classificação, conforme o tipo de utilização. Já os equipamentos apresentam relação com dados de medição. Tais relações e atributos correspondem às propriedades de dados e objetos apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Propriedades da ontologia simplificada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os atributos correspondem ao armazenamento de valores numéricos, como a pontuação obtida (*score*), descrições alfanuméricas, datas e dados geoespaciais. Sendo este último necessário para a vinculação com os dados abertos sobre o entorno do ambiente construído, correspondendo à importação da ontologia GeoSparql.

6.2 Ontologia de Domínio Fundamentada

No processo de desenvolvimento da ontologia reutilizou-se outras ontologias de domínio bem estabelecidas para tirar proveito da riqueza semântica dos conceitos relevantes e agilizar o próprio desenvolvimento reduzindo os termos para definição e representação. Tendo em vista a boa prática de reuso de ontologias, e a contribuição das ontologias de fundamentação para o desenvolvimento de ontologias de domínio, um dos critérios usados na seleção de ontologias para reuso pode ser a uniformidade da ontologia de topo no qual a ontologia candidata foi fundamentada, visto que, quando diferentes ontologias de domínio compartilham uma mesma ontologia de nível superior, elas apresentam uma maior interoperabilidade semântica. Assim, a definição da ontologia de topo foi escolhida para representar o domínio de conhecimento e reutilizar os elementos representados. Conceitos, relações e propriedades são analisados à luz da ontologia de fundamentação (Farinelli & Souza, 2021).

A modelagem conceitual contempla mais detalhes para a implementação (Figura 10) e foi realizada no Visual Paradigm com o *plugin* OntoUML¹³ que permite a vinculação dos estereótipos da ontologia de fundamentação UFO. OntoUML é uma linguagem de representação de ontologias que utiliza diagrama de classes UML (*Unified Modeling Language*) e incorpora importantes distinções fundamentais feitas pela UFO. Após as execuções de validação do diagrama, realizou-se a conversão para gUFO e novas verificações foram realizadas no Protégé 5.5.

Uma Zona do ambiente construído é estereotipada como um *kind* generalizado em *subkinds* Construção, Espaço e Andar. Esta organização de classes permite interligar andares e demais espaços, como um apartamento composto por quartos, banheiro, sala e cozinha. O estilo da zona, estereotipado como *mode*, é uma importante classificação para organizar e identificar zonas relevantes para avaliação do ambiente, como áreas verdes, estacionamento para veículos verdes, entre outros. Uma Zona ainda tem relação com *quality Area* para registro das medidas de ocupação por metro quadrado.

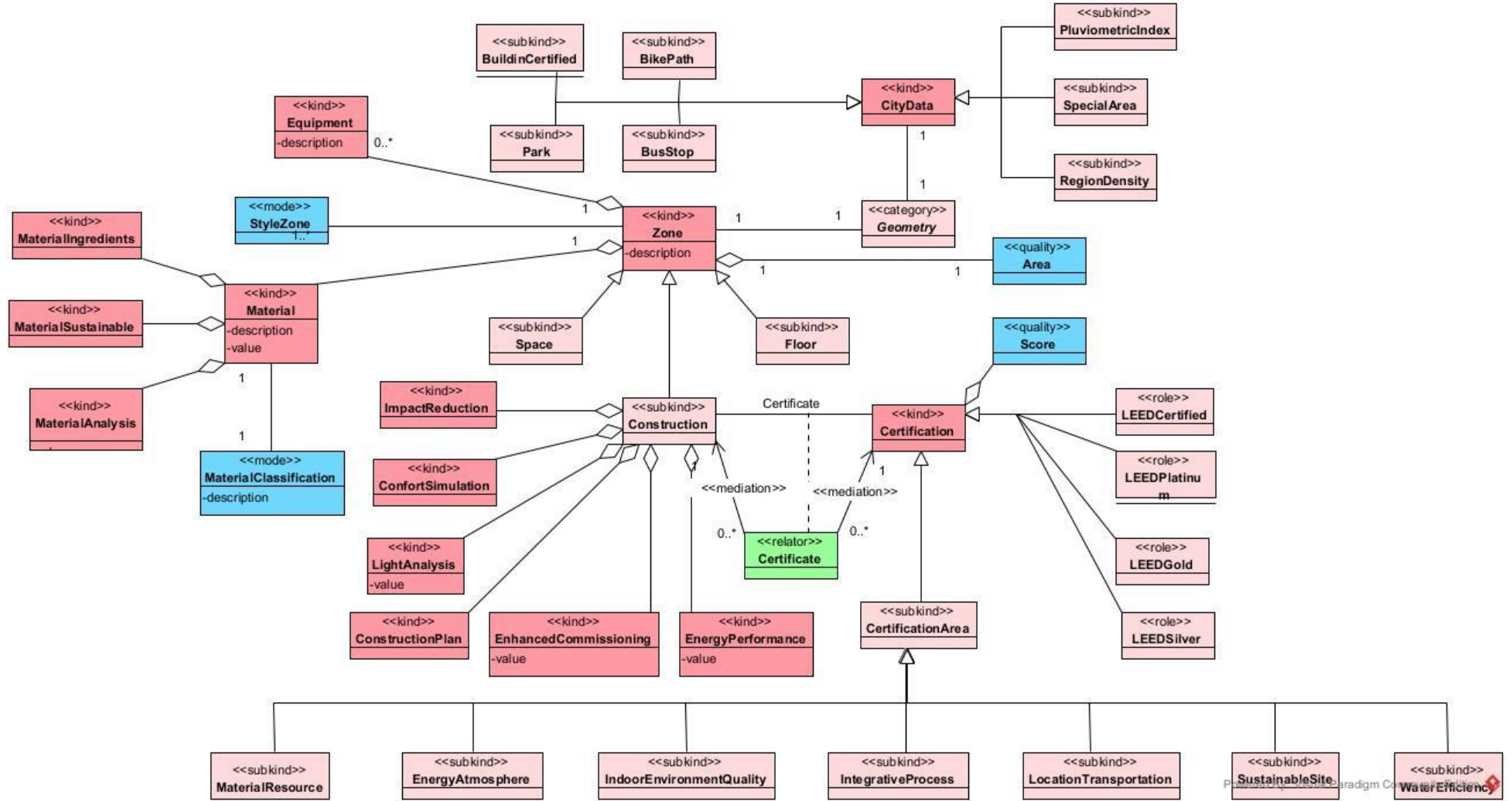
Uma Construção pode ter registros sobre Análises de Iluminação, Simulação de Conforto, Simulação Energética, Redução de Impacto Ambiental, Comissionamento e Plano de Construção. As classes foram definidas como *kinds* e relacionadas por agregação.

A classe *Geometry*, estereotipada como *category* e relacionada à ontologia GeoSparql, relaciona-se com Zona e Dados da Cidade (*kind CityData*). Este relacionamento

¹³ <https://github.com/OntoUML/ontouml-vp-plugin>

favorece a criação de axiomas para inferências do ambiente construído com áreas especiais, ciclovias, parques, construções vizinhas certificadas e densidade da região.

Figura 10 – Modelagem conceitual fundamentada



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os conceitos de Materiais e Equipamentos, classes *kind* foram consideradas para abstrair esses dados, e foi criado um relacionamento de inclusão em uma Zona. O uso de equipamentos envolve a medição de dados e a localização interna de sensores, equipamentos de ar-condicionado, placas fotovoltaicas, entre outros. Já o relacionamento de zonas com materiais busca identificar o atendimento aos requisitos de sustentabilidade. Os materiais têm relação para a sua composição de matérias primas (*kind MaterialIngredients*), informações sobre certificações sustentáveis (*kind MaterialSustainable*), valores de análises quantitativas (*kind MaterialAnalysis*) e classificação (*mode MaterialClassification*), conforme o tipo de utilização. Tais relações e atributos correspondem às propriedades de dados e objetos.

Para registrar o atendimento aos critérios, uma Construção se relaciona com a classe Certificação. Conforme fundamentação UFO, essa relação é mediada por uma classe *relator Certificate*. Os critérios são *subkinds* da generalização da Área de Certificação para agrupamentos sobre Localização e Transporte, Eficiência Hídrica, Energia e Atmosfera, Recursos e Materiais, Crédito de Prioridade Regional, Qualidade Ambiental Interna e Inovação. Uma vez realizada a inferência sobre os critérios e obtida a pontuação estimada para a Construção, uma instância para uma classe *role (LEEDCertified, LEEDPlatinum, LEEDGold, LEEDSilver)* é criada.

6.3 Anotação de Dados Tabulares

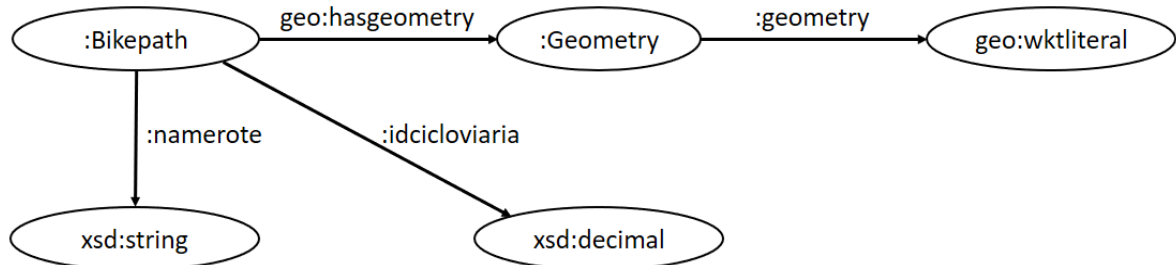
A disponibilidade de dados abertos na Web é uma das ações tomadas por prefeituras com o intuito promover uma cidade inteligente (Isotani & Bittencourt, 2015). Tratando-se do site da prefeitura de Belo Horizonte, é possível encontrar conjuntos de dados sobre serviços e locais, mas, ainda sem utilizar as potencialidades da Web Semântica. A quantidade de dados é excessiva para interpretação humana e torna a interligação de dados dispendiosa e suscetível a erros.

Dados abertos sobre meios de transporte e parques são utilizados para avaliação de critérios sobre localização e transporte da certificação LEED. Estes conjuntos de dados contêm coordenadas geométricas de áreas e pontos da cidade, seguindo padronização da OGC (*Open Geospatial Consortium*), que define um vocabulário para representar dados geoespaciais.

A partir da análise desses conjuntos de dados, foi estabelecido um modelo conceitual para organizá-los em uma ontologia de domínio. Os conjuntos de dados extraídos do site da prefeitura têm colunas similares para a identificação, nome e coordenadas geométricas. O grafo exibido na Figura 11 representa o esquema (T-Box) utilizado para organizar os dados de ciclovias. Um registro da tabela de origem é mapeado como um objeto

da classe *Bikepath* que tem uma geometria de localização (*Geometry*) do tipo *geo:wktliteral*, um nome da rota com caracteres alfanuméricos (*namerote*) e uma numeração de identificação (*idbikepath*).

Figura 11 – Esquema para dados de ciclovias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a modelagem ontológica, os objetos são identificados e qualificados por suas classes, propriedades e relações. Uma vez mapeados para as ontologias, exibidas na Tabela 6, os dados adquirem semântica formal facilitando a integração com os dados de um modelo BIM.

Tabela 6 – Namespaces das ontologias utilizadas

Prefixo	NameSpace	Ontologia
sebim:	http://semanticweb.org/sebim/ext#	Ontologia base
geo:	http://www.opengis.net/ont/geosparql#	GeoSparql
dbr:	http://dbpedia.org/resource/	Dbpedia
xsd:	http://www.w3.org/2001/XMLSchema#	XML Schema
rdf;	http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#	RDF
gufo	http://purl.org/nemo/gufo#	UFO
rdfs	http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#	RDFS

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 7 é apresentada a anotação dos dados explícitos de ciclovias com atributos das colunas do conjunto de dados e referência às ontologias. Os dados são mapeados conforme ontologia própria com o prefixo bp. Destaca-se também que a utilização do formato *geo:wktliteral* é necessária para realização de consultas conforme as especificações da OGC (Perry & Herring, 2011). Na Tabela 8 é apresentada a especificação dos dados implícitos compondo o mapeamento para DM.

Tabela 7 – Especificação dos dados explícitos

Column	Attribute	AttributeOf	Format
Id_rota_cicloviaria	sebim:ldcicloviaria	??bikepath	
Nome_rota	sebim:namerote	??bikepath	xsd:string
Extensao_ciclovia	sebim:extension	??bikepath	xsd:decimal
Geometria	geo:geometry	??geometry	geo:wktliteral

Fonte: Elaborado pelo autor.

O objeto *bikepath* é vinculado ao objeto *bike_path* da ontologia *dbpedia*, utilizando a propriedade *wasDerivedFrom* para referenciar essa entidade preexistente relevante na elaboração deste mapeamento. Este objeto também é relacionado ao objeto *geometry*, que segue o padrão OGC, usando a coluna geometria para a representação dos tipos geométricos.

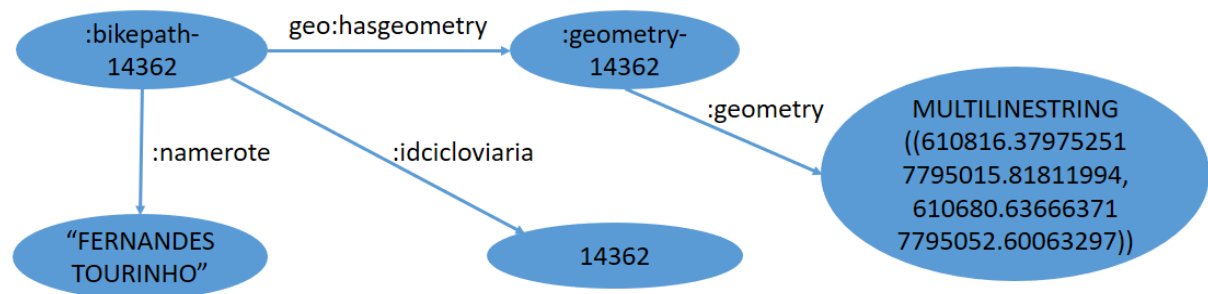
Tabela 8 – Especificação dos dados implícitos

Column	Entity	Role	inRelationTo	wasDerivedFrom
??bikepath	sebim:Bikepath	geo:hasGeometry	??geometry	dbr:Bike_path
??geometry	sebim:Geometry			

Fonte: Elaborado pelo autor.

O grafo RDF gerado pela execução do *script* *sdd2rdf* contém a formalização dos dados armazenados, conforme esquema da Figura 12.

Figura 12 – Dados armazenados conforme esquema



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 2 é apresentada uma parte do grafo RDF, gerado conforme o mapeamento dos dados tabulares das ciclovias de Belo Horizonte.

Além do conjunto de dados referentes às ciclovias, dados sobre parques e pontos de ônibus e edificações certificadas também foram convertidos em grafos RDF e

armazenados no *triplestore* para integração e criação das inferências. Os dados das edificações certificadas foram obtidas no site da certificação LEED¹⁴.

Quadro 2 – Grafo RDF gerado

```
<rdf:Description rdf:about="http://example.com/kb/example#geometry">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#Class"/>
  <rdfs:label rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Geometry</rdfs:label>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.com/kb/example#Geometry"/>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:about="http://example.com/kb/example#bikepath">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#Class"/>
  <rdfs:label rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Bicycle_path</rdfs:label>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://example.com/kb/example#Bikepath"/>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:nodeID="node1eg15e4o3x19">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#Restriction"/>
  <owl:someValuesFrom
rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">dbr:Bike_path</owl:someValuesFrom>
  <owl:onProperty rdf:resource="http://www.w3.org/ns/prov#wasDerivedFrom"/>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:about="http://example.com/kb/example#Geometria">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#Class"/>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="http://www.opengis.net/ont/geosparql#asWKT"/>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:about="http://example.com/kb/example#Nome_rota-14362">
  <rdf:type rdf:resource="http://example.com/kb/example#Nome_rota"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://example.com/kb/example#nomerota"/>
  <sio:isAttributeOf rdf:resource="http://example.com/kb/example#bikepath-14362"/>
  <rdfs:label rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Nome_rota</rdfs:label>
  <sio:hasValue rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">FERNANDES
TOURINHO</sio:hasValue>
</rdf:Description>
<rdf:Description rdf:about="http://example.com/kb/example#Geometria-14362">
  <rdf:type rdf:resource="http://example.com/kb/example#Geometria"/>
  <rdf:type rdf:resource="http://www.opengis.net/ont/sf#MultiLineString"/>
  <sio:isAttributeOf rdf:resource="http://example.com/kb/example#geometry-14362"/>
  <rdfs:label rdf:datatype="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string">Geometria</rdfs:label>
  <geo:asWKT rdf:datatype="http://www.opengis.net/ont/geosparql#wktLiteral">MULTILINESTRING
((610816.37975251 7795015.81811994, 610680.63666371 7795052.60063297))</geo:asWKT>
</rdf:Description>
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Inferências para Avaliação

Conforme as pesquisas apresentadas no Capítulo 4, RDF e *Linked Data* têm recebido atenção crescente na indústria da construção civil. Um motivo relevante é que as soluções baseadas em tecnologias semânticas para gerar inferências sobre os dados podem ser implementadas sem a dependência de sistemas proprietários.

¹⁴ <https://www.gbcbrazil.org.br/certificacao/certificacao-leed/>

Utilizar regras lógicas da Web Semântica é uma solução para calcular automaticamente as pontuações do projeto de construção sobre as cláusulas de análise sobre os dados internos do projeto BIM. A primeira versão do artefato desta pesquisa baseou-se na aplicação de regras lógicas em SWRL. Como exemplo, adota-se aqui o critério que avalia a instalação de uma área de bicicletas, calculada sobre a quantidade de unidades do edifício. Foi definida a identificação pela classificação do material e a quantidade fixa de quatro unidades na edificação. A regra SWRL (2) foi criada no Protégé 5.5 para esta avaliação.

```
sebim:BicycleFacility(?w)^sebim:Material(?m)^sebim:hasMaterialClassification
(?m, sebim:RackBike) ^ sebim:value(?m, ?n) ^ swrlb:greaterThanOrEqual(?n,
4) -> sebim:score(?w, 1) (2)
```

Conforme Bassiliades (2018), SWRL tornou-se uma escolha popular para o desenvolvimento de aplicativos baseados em regras. Porém, como o SWRL existe há mais de dez anos, é provável que não se torne um padrão, sendo o seu escopo difícil de alcançar o mundo industrial. Além disso, como a inferência da SRWL é monotônica, a utilização da função *swrlb:count()* não atende à necessidade de contar a quantidade de unidades na edificação. Essa função gera uma repetição infinita, tornando a regra indecidível. Diante desta restrição, o quantitativo de unidades ficou fixo em quatro na regra (2).

Por outro lado, SPARQL se tornou um padrão na indústria para representar regras e restrições em modelos da Web Semântica, sendo bem suportado por vários mecanismos e bancos de dados. SPARQL admite uma série de filtros e operadores que permitem fazer consultas complexas ao conjunto de triplas armazenadas. Uma vez que os dados são integrados a outros, utilizar esta linguagem é uma solução ideal para centralizar as inferências. Além de ser a melhor solução para consultas federadas, SPARQL é mais que uma linguagem de regras, pois fornece meios para expressar restrições e definir novas funções e modelos.

Assim, considerando a regra SWRL para bicicletário, uma consulta foi gerada para entendimento da conversão para as inferências em SPARQL. Para melhor entendimento e comparação, os nomes das variáveis são mantidos. Destaca-se ainda a utilização de uma subconsulta para obter a quantidade de unidades (apartamentos) para uma apuração genérica. Na regra (3) é exibida a utilização do comando CONSTRUCT para retornar uma tripla, substituindo as variáveis desta consulta e combinando as triplas em um único grafo RDF.

```
PREFIX sebim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> (3)
```

```

CONSTRUCT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#score> "1"^^xsd:decimal}
WHERE {
  ?bike rdf:type sevim:Material.
  sevim:RackBike sevim:isMaterialClassificationOf ?bike.
  ?v gufo:inheresIn ?bike.
  ?v gufo:hasQualityValue ?n.
  {SELECT (count(?s) as ?place)
   WHERE { ?s rdf:type sevim:Zone.}
  }
}
GROUP BY ?bike ?v ?n ?place
HAVING (?place <= ?n)

```

A partir desta consulta, um INSERT (4) cria esta tripla inferida no conjunto de dados, direcionando a pontuação à classe correspondente ao critério de instalação para bicicletas. Destaca-se que a contagem de unidades é realizada pela sub consulta que retorna a quantidade de espaços do ambiente construído.

```

PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>

INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#score> "1"^^xsd:decimal}
WHERE {
  ?bike rdf:type sevim:Material.
  sevim:RackBike sevim:isMaterialClassificationOf ?bike.
  ?v gufo:inheresIn ?bike.
  ?v gufo:hasQualityValue ?n.
  {SELECT (count(?s) as ?place)
   WHERE { ?s rdf:type sevim:Zone.}
  }
}
GROUP BY ?bike ?v ?n ?place
HAVING (?place <= ?n)

```

(4)

Para validar a inferência realizada, a consulta (5) é utilizada para conferir a inserção desta nova tripla.

```

PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>

SELECT *
WHERE {
  ?m rdf:type sevim:BicycleFacilities.
  ?m sevim:score ?y.
}

```

(5)

Extensões como GeoSparql podem ser aplicadas para proporcionar melhores resultados para geração de conhecimento. O GeoSparql¹⁵, padrão da OGC, não define apenas um vocabulário para representar dados geoespaciais na Web Semântica, mas também especifica uma extensão para a linguagem de consulta SPARQL para processar esses dados geoespaciais (Perry & Herring, 2011). A aplicação deste padrão com a ontologia BIM também pode ser vista em (Zhang, C.; Beetz; De Vries, 2018). Os autores elaboraram uma ontologia convertendo as geometrias dos ambientes de um projeto construtivo para o padrão GeoSparql para extração de informações.

Conforme abordado ao longo deste capítulo, as consultas para análises sobre o entorno exigem a utilização de funções GeoSparql. Os dados abertos e os dados de localização do terreno seguem o formato padrão GML (*Geographic Markup Language*). O GeoSparql é usado para capturar as coordenadas geoespaciais do ambiente usando representações de polígonos *Well-Known-Text* (WKT). Conforme exibido na Figura 13, WKT é uma linguagem de marcação de texto para representar objetos de geometria vetorial em um mapa, sistemas de referência espacial de objetos espaciais e transformações entre sistemas de referência espacial.



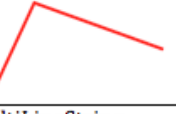
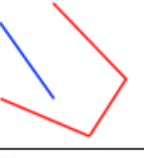
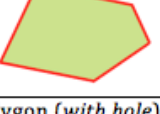
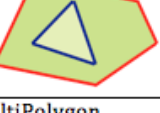
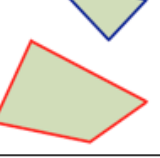
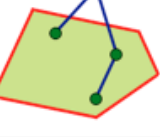
Uma vez os dados organizados conforme os padrões adotados, as consultas, conforme o exemplo (6) que analisa a proximidade de pontos de ônibus, são aplicadas para identificação de proximidades de áreas de convivência, meios de transporte e densidade da região da edificação.

Este processo de geração de inserções via SPARQL é utilizado para os demais critérios para automação da avaliação para certificação LEED. No Capítulo 7 é apresentada a validação destas consultas, conforme suas características envolvendo o agrupamento de dados internos e externos do modelo BIM e dados de simulações.

As inferências aplicadas levaram em consideração um projeto BIM com as informações de materiais e espaços. Cabe reforçar que a modelagem tridimensional é realizada em *softwares* especializados e os dados podem ser criados como informações gerais ou parâmetros de materiais e elementos que compõem o projeto. As inserções de dados precisam adotar padrões para que as consultas sejam realizadas com sucesso e as inferências otimizem a avaliação para certificação.

¹⁵ <https://www.ogc.org/standards/geosparql>

Figura 13 – Representações para os tipos de geometria

<i>Geometry Type</i>	<i>WKT representation</i>
Point 	<code>POINT(3 7)</code>
Multipoint 	<code>MULTIPOINT(3 7, 4 2, 8 6)</code>
LineString 	<code>LINESTRING(1 2, 3 6, 9 4)</code>
MultiLineString 	<code>MULTILINESTRING((1 8, 4 4), (4 9, 8 5, 6 2, 1 4))</code>
Polygon 	<code>POLYGON((1 2, 6 1, 9 3, 8 5, 3 6, 1 2))</code>
Polygon (with hole) 	<code>POLYGON((1 2, 6 1, 9 3, 8 5, 3 6, 1 2), (3 3, 5 5, 6 2, 3 3))</code>
MultiPolygon 	<code>MULTIPOLYGON(((1 2, 6 1, 9 3, 3 6, 1 2)), ((4 9, 7 6, 9 8, 4 9)))</code>
GeometryCollection 	<code>GEOMETRYCOLLECTION(POINT(4 5), POINT(7 4), POINT(6 2), LINESTRING(4 5, 6 7, 7 4, 6 2), POLYGON((1 2, 6 1, 9 3, 8 5, 3 6, 1 2)))</code>

Fonte: Williams (2018).

As simulações realizadas em ferramentas especializadas apresentam graficamente alguns resultados, que não são inseridos no formato IFC. Portanto, a importação destes resultados é complexa e pode ser apoiada por campos definidos em informações gerais do projeto. Esta proposta é uma solução simplificada adotada nas consultas baseadas nos resultados de simulações.

```

PREFIX bim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX ex: <http://www.example.org/POI#>
PREFIX uom: <http://www.opengis.net/def/uom/OGC/1.0/>
PREFIX geo: <http://www.opengis.net/ont/geosparql#>
PREFIX geof: <http://www.opengis.net/def/function/geosparql/>

INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "1"^^xsd:decimal }
WHERE {
  ?build rdf:type bim:Terrain.
  ?build geo:asWkt ?pb.
  ?build ?x ex:busstation.
  ?bus ?y ex:geometria.
  ?bus geo:asWKT ?pl.
  ?w rdf:type bim:QualityTransport.
  FILTER (geof:distance(?pb, ?fpl, uom:metre) <= 800)
}

```

Ao final do processo, a consulta (7) é realizada para apresentar o resultado das inferências para que o especialista analise e tome as decisões para promover alterações no projeto e melhorar a pontuação.

```

PREFIX bim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#>
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>

SELECT ?c ?n
WHERE {
  ?c rdfs:subClassOf bim:CertificationArea.
  ?c bim:Score ?n. }

```

A apresentação final ao usuário pode ser implementada em uma aplicação web onde o especialista forneça os dados de um modelo BIM, através da importação de um arquivo IFC ou arquivos tabulares, execute as inferências e obtenha informações sobre o projeto para certificação LEED.

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é realizada a análise dos resultados da pesquisa, respondendo aos subproblemas teóricos 12 e 13 de validação e 14 de predição descritos no Capítulo 5.

As questões de competências, que são os critérios para a certificação LEED, são usadas para a avaliação da ontologia. Em sequência, um conjunto finito de testes são realizados para analisar o comportamento e atendimento aos requisitos do artefato elaborado.

7.1 Avaliação da ontologia

A avaliação estrutural e semântica analisa o conteúdo da ontologia em termos de sua adequação aos requisitos definidos e a satisfação dos profissionais da área de conhecimento da ontologia. É preciso verificar a competência da ontologia, isto é, se os resultados atendem às especificações definidas e assegurar que a ontologia atenda ao seu propósito. Deve-se, também, avaliar se a ontologia satisfaz outros critérios de qualidade, tais como clareza, coerência, consistência, comprometimento ontológico mínimo, aderência a padrões estabelecidos para seu desenvolvimento (Falbo, 2014).

Para verificar a capacidade da ontologia, para responder à cada questão de competência foram identificados os elementos da ontologia. Os conceitos de um ambiente construído e demais informações relevantes à avaliação para análise da sustentabilidade, são relacionadas para obtenção de quantitativos e comparações sobre os critérios da certificação LEED. A Tabela 9 apresenta os conceitos, relações, propriedades e axiomas que comprovam o atendimento às questões de competência.

Tabela 9 – Verificação de Competência

Critério para Certificação LEED	Descrição
Localização do LEED Neighborhood (Bairros)	BuildingCertified tem localização em asWkt Construction tem localização em asWkt Filtro de distância entre as localizações por função GeoSparql
Proteção de Áreas Sensíveis	Construction tem localização em asWkt RiskArea tem localização em asWkt Filtro de distância entre as localizações por função GeoSparql
Local de Alta Prioridade	Construction tem localização em asWkt SpecialArea tem localização em asWkt Filtro de distância entre as localizações por função GeoSparql
Densidade do Entorno e Usos Diversos	Construction tem localização em asWkt RegionDensity tem localização em asWkt Filtro de inclusão entre as localizações por função GeoSparql
Acesso a Transporte de Qualidade	BusStop tem localização em asWkt Construction tem localização em asWkt Filtro de distância entre as localizações por função GeoSparql

Instalações para Bicicletas	Material é classificado como RackBike Material tem um valor quantitativo Space tem contagem para unidades da construção Filtro comparativo entre quantidade de vagas e unidades
Veículos Verdes	Material tem classificação como ChargeCar
Espaço Aberto	Construction tem Area registrada em value Zone tem StyleZone como Vegetação Zone tem Area registrada em value Filtro para comparação entre as áreas
Gestão de Águas Pluviais	CityData tem PluviometricIndex Space tem StyleZone StyleZone identifica cobertura natural
Redução de Ilhas de Calor	Space tem StyleZone Space tem Material Material tem MaterialClassification Material tem value relativo à refletância
Redução da Poluição Luminosa	Construction tem LightAnalysis LightAnalysis tem value Filtro dos valores conforme parâmetros do critério
Redução do Uso de Água do Exterior	Construction tem Equipment Construction tem Material Material tem MaterialClassification MaterialClassification identifica irrigadores MaterialClassification identifica armazenamento de água Space tem StyleZone StyleZone identifica vegetação
Redução do Uso de Água do Interior	Construction tem Equipment Construction tem Material Material tem MaterialClassification MaterialClassification identifica conexões MaterialClassification identifica certificação Space tem StyleZone StyleZone identifica ambientes
Uso de Água de Torre de Resfriamento	Material tem MaterialClassification Material é classificado como WaterTower Material tem MaterialAnalysis MaterialAnalysis tem value Filtro para valores parametrizados conforme LEED
Medição de Água	Material tem MaterialClassification Material é classificado como Hydrometer Material tem um valor quantitativo Space tem contagem para unidades da construção Filtro comparativo entre quantidade de hidrometros e unidades
Comissionamento Avançado	Construction tem EnhancedCommissioning
Otimizar Desempenho Energético	Construction tem EnergyPerformance
Medição de Energia Avançada	Material tem MaterialClassification Material é classificado como EnergyMeter
Resposta à Demanda	Construction tem GridHarmonization
Produção de Energia Renovável	Construction tem energyValue Construction tem Equipment Equipment tem energyValue Filtro comparativo entre o consume estimado e o produzido renovável
Gerenciamento Avançado de Gases Refrigerantes	Construction tem Material Material tem MaterialClassification

	MaterialClassification identifica certificação de baixa emissão
Energia Verde e Compensação de Carbono	Construction tem energyValue Construction tem Equipment Equipment tem energyValue Filtro comparativo entre o consume estimado e o produzido renovável
Redução do Impacto do Ciclo de Vida do Edifício	Construction tem ImpactReduction
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Declarações Ambientais de Produto	Construction tem Material Material tem MaterialSustainable
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Origem de Matérias-primas	Construction tem Material Material tem MaterialSustainable Material tem MaterialIngredients MaterialIngredients tem certificação
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Ingredientes do Material	Construction tem Material Material tem MaterialIngredients MaterialIngredients tem certificação Filtro pela quantidade de materiais certificados em relação ao total de materiais na construção
Gerenciamento da Construção e Resíduos de Demolição	Construction tem ConstructionPlan
Estratégias Avançadas de Qualidade do Ar Interior	Construction tem Equipment
Materiais de Baixa Emissão	Construction tem Material Material tem MaterialClassification MaterialClassification identifica certificação de baixa emissão
Plano de Gestão da Qualidade do Ar Interior da Construção	Construction tem Equipment
Avaliação da Qualidade do Ar Interior	Construction tem Equipment Construction tem Material Material tem MaterialClassification
Conforto Térmico	Construction tem Equipment Construction tem Material Material tem MaterialClassification Construction tem ConfortSimulation
Iluminação Interna	Construction tem LightAnalysis LightAnalysis tem value Filtro dos valores conforme parâmetros do critério
Luz Natural	Construction tem LightAnalysis LightAnalysis tem value Filtro dos valores conforme parâmetros do critério
Vistas de Qualidade	Construction tem Equipment Construction tem Material Material tem MaterialClassification Construction tem ConfortSimulation
Desempenho Acústico	Construction tem Equipment Construction tem Material Material tem MaterialClassification Construction tem ConfortSimulation
Prioridade Regional	Construction tem ConstructionPlan

Fonte: Elaborado pelo autor.

A validação da ontologia é a atividade de avaliação que compara o significado das definições da ontologia com o modelo pretendido da porção do mundo que a ontologia pretende conceituar (Poveda-Villalón et al., 2015). Foram realizadas demonstrações a especialistas em sustentabilidade em edificações, utilizando os conceitos da ontologia instanciados com elementos do mundo real, como os dados externos sobre o entorno da edificação e dados de projetos acadêmicos desenvolvidos em *softwares* BIM. A Tabela 10 apresenta a instanciação produzida representando cada conceito da ontologia e instâncias do mundo real.

Tabela 10 – Instanciação da Ontologia

Conceito	Descrição
Construction	Informações de projeto do arquivo IFC de um projeto BIM
Floor	Níveis de elevação do arquivo IFC de um projeto BIM
Space	Ambientes do arquivo IFC de um projeto BIM
StyleZone	Estilo dos ambientes do arquivo IFC de um projeto BIM
Material	Materiais do arquivo IFC de um projeto BIM
MaterialClassification	Classificação de material obtidos no arquivo IFC
Equipment	Equipamentos de um projeto obtidos no arquivo IFC
BuildingCertified	Informações de construções certificadas obtidas no site do LEED
Park	Informações de áreas verdes obtidas no site da prefeitura
BusStop	Informações de pontos de ônibus no site da prefeitura
BikePath	Informações de ciclovias obtidas no site da prefeitura

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez desenvolvida a ontologia fundamentada em UFO, foi realizada a verificação automática de regras sintáticas OntoUML. A ferramenta (*plugin*) disponível para o Visual Paradigm (citado no Capítulo 6) também realiza a verificação do modelo para validar a consistência e satisfatibilidade, exibindo problemas sobre os elementos e suas relações para padronização conforme os estereótipos da ontologia de topo.

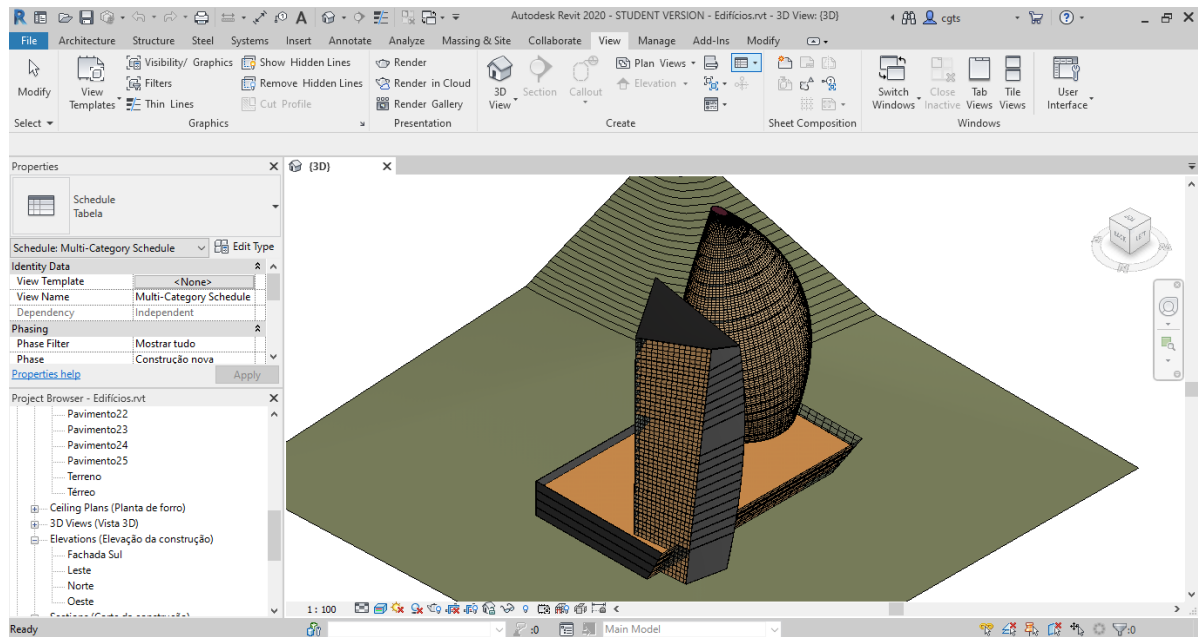
7.2 Validação do artefato

Para validar os métodos para o desenvolvimento do arcabouço, foi escolhido um projeto acadêmico elaborado com alunos do curso de arquitetura da Universidade FUMEC, com vistas ao aprendizado em modelagem e simulações em BIM. A modelagem, exibida na

Figura 14, foi criada no *software* Autodesk Revit¹⁶ e contém edifícios envidraçados com 27 áreas (pavimentos).

O Revit é uma ferramenta para modelagem tridimensional em BIM que oferece suporte a um projeto multidisciplinar com a organização das informações, bem como possibilita simulações para análises antecipadas da construção e exportação dos dados para integração com outras ferramentas.

Figura 14 – Projeto BIM desenvolvido no Autodesk Revit



Na primeira tentativa de exportar dados, optou-se por gerar o arquivo IFC no Revit. De posse deste arquivo, buscou-se converter o formato IFC em grafo RDF. As ferramentas escolhidas foram:

- IFCtoRDF¹⁷: conversão baseada na ontologia ifcOWL.
- IFCtoLDB¹⁸: conversão conforme a ontologia BOT.

Ambas convertem os dados do arquivo para as suas respectivas ontologias. Porém, é possível considerar estas ferramentas ainda limitadas, devido à obtenção de uma superficialidade semântica das relações entre as classes dessas ontologias (exclusivamente relações de subsunção). Assim, a organização final das informações constitui antes uma taxonomia do que uma ontologia.

¹⁶ <https://www.autodesk.com.br/products/revit>

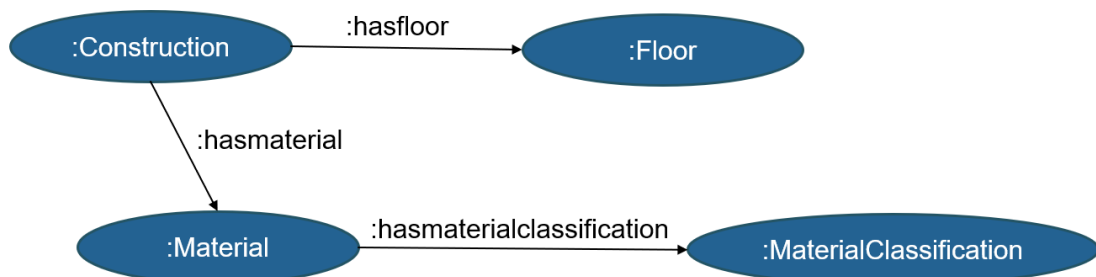
¹⁷ <https://github.com/pipauwel/IFCtoRDF>

¹⁸ <https://github.com/jyrkioraskari/IFCtoLBD>

Diante da insuficiência do resultado obtido, a segunda tentativa de exportar dados envolveu a geração de arquivos tabulares no Revit, ao invés de exportar em formato IFC. Devido à limitação do filtro de exportação do Revit, foram gerados dois arquivos, sendo um contendo os dados de materiais e o outro os dados das áreas.

A partir da exportação dos arquivos, a anotação semântica foi realizada conforme o mapeamento das colunas do arquivo tabular para os dados explícitos (Tabela 11) e dados implícitos para os relacionamentos entre as entidades (Tabela 12). A Figura 15 apresenta o grafo resultante.

Figura 15 – Grafo do mapeamento em BIM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta tentativa se mostrou mais eficaz, uma vez que permitiu utilizar a ferramenta sdd2rdf, vinculando os dados à ontologia SEBIM, desenvolvida neste trabalho.

Tabela 11 – Especificação dos dados explícitos do projeto BIM

Column	Attribute	AttributeOf	Format
Dados de Materiais			
Id	sebim:id	??construction	
Category	sebim:name	??materialclassification	xsd:string
Type	sebim:type	??materialclassification	xsd:string
Family	sebim:name	??material	xsd:string
Count	sebim:value	??material	xsd:decimal
Dados de Áreas			
Id	sebim:id	??construction	
Nível	sebim:name	??floor	xsd:string
Area	sebim:area	??floor	xsd:string
Perimetro	sebim:value	??floor	xsd:decimal

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados do projeto BIM a ser avaliado como sustentável e os dados da prefeitura de Belo Horizonte foram anotados semanticamente por meio do dicionário semântico e convertidos de forma integrada para o padrão RDF (com a ferramenta *sdd2rdf*) e, por fim, inseridos no *triplestore*. A execução das inferências via consultas SPARQL gerou novas triplas contendo a pontuação final para verificar se os critérios da certificação LEED foram ou não atendidos.

Tabela 12 – Especificação dos dados implícitos do projeto BIM

Column	Entity	Role	inRelationTo
??construction	sebim:Construction	sebim:hasMaterial	??materialclassification
??materialclassification	sebim:Material Classification		
??material	sebim:Material	sebim:hasMaterial Classification	??materialclassification
??construction	sebim:Construction	sebim:hasFloor	??floor
??floor	sebim:Floor		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os critérios analisados no projeto em questão são apresentados na Tabela 13. Pode-se concluir que apenas dois critérios não obtiveram nota máxima. Cabe ainda destacar que os critérios com nota máxima acima de 1, podem apresentar escalas de pontuação definidas no manual LEED.

Tabela 13 – Pontuação dos critérios utilizados na experimentação

Critério	Pontuação
Localização do LEED Vizinhança (Bairros)	0
Acesso a transporte de qualidade	5
Instalações para bicicletas	0
Veículos verdes	0
Espaço aberto	1
Produção de energia renovável	0
Ingredientes do material	2
Iluminação interna	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra forma para validar o artefato trata-se de confrontar com o referencial teórico, conforme o subproblema 12. Destaca-se que o problema de validação está dentro do contexto da DSR, conforme Wieringa (2009), onde as soluções devem satisfazer os critérios identificados.

Diante das dificuldades identificadas para a organização das informações para o processo de certificação, o artefato proposto é validado pelos critérios de solução, encontrados na resolução do subproblema 3. Na Tabela 14 são exibidas as dificuldades, abordadas no Capítulo 3, e os critérios de solução, aplicando as tecnologias semânticas descritas no Capítulo 4.

A utilização da tecnologia BIM é um fator determinante para a evolução do trabalho colaborativo de profissionais da indústria da construção. O registro dos dados, associado aos elementos representados tridimensionalmente, é essencial para a organização das informações referentes ao projeto do ambiente construído. Mesmo utilizando as ferramentas especializadas em BIM, a recuperação das informações é trabalhosa. Assim, a conversão do formato IFC para OWL é um critério abordado como a melhor solução para aumentar a semântica entre os dados e a recuperação de informações para análises. Além disso, a integração com outros conjuntos de dados, como dados de prefeituras, anotados semanticamente, é facilitada.

Tabela 14 – Solução para as dificuldades encontradas

Dificuldade	Solução
Extensão do formato IFC da tecnologia BIM	Conversão do IFC para uma ontologia simplificada
Integração com dados externos	Anotação semântica de dados tabulares
Organização das informações	Grafos de conhecimento
Análise dos dados	Inferências SPARQL
Recuperação de dados	Consultas SPARQL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os conjuntos de dados são armazenados em um *triplestore* para organizar e proporcionar a extração das informações. Através da adoção deste modelo ontológico, a aplicação de inferências apoia a análise de especialistas e, conseqüentemente, proporciona melhor desempenho na obtenção de informações relacionadas ao atendimento dos critérios para certificação. Os resultados são obtidos em consultas sobre as triplas RDF, demonstrando que as tecnologias semânticas contribuem para a melhor organização e integração das informações.

Nesta seção, também é resolvido o subproblema 13, cujo enunciado é: Por que o modelo criado é capaz de melhorar o processo de avaliação? Em especial, este problema é resolvido se for mostrado que o modelo criado atende aos critérios de solução para as dificuldades encontradas, apresentados na Tabela 13. A seguir, é analisado como cada um desses critérios de solução foi atendido pelo modelo proposto.

A anotação semântica de dados externos favorece à integração de dados à ontologia BIM. Esta solução acrescenta relacionamentos semânticos a serem explorados em várias abordagens para identificação de locais relevantes para os usuários da edificação. Outra contribuição relevante dessa adoção é a utilização do *script* `sdd2rdf`, que tem sido empregado principalmente com dados de estudos científicos. As triplas geradas favorecem a melhor integração e extração de dados, necessários para análises dos critérios de avaliação para certificação LEED, como aqueles contemplados na área de Localização e Transporte.

Essa experimentação baseou-se na criação de instâncias e atributos para validação das inferências para os critérios da certificação LEED. Diante da complexidade de informações necessárias para todos os critérios, selecionou-se aqueles que representassem um tipo de extração diferente. Assim, dos 37 critérios para uma nova construção, foram implementados oito critérios, conforme apresentado na Tabela 15.

O estudo para conhecimento das exigências de cada critério é necessário para a elaboração das consultas para inferência. A ontologia `ifcOWL` é a base para a identificação das classes e atributos dos elementos do ambiente construído como materiais, equipamentos e espaços. Para as análises que necessitam de informações externas, como dados sobre o entorno e meios de transporte, a identificação das classes e atributos baseia-se na ontologia base para a anotação semântica. Assim, segue o detalhamento sobre os critérios implementados:

- O critério que corresponde em pontuar o ambiente construído conforme a certificação LEED de edificações vizinhas requer a integração com os dados abertos no site da GBC Brasil. A função `GEOSPARQL` é utilizada para analisar a distância entre as construções.
- O acesso ao transporte de qualidade também requer a análise de distância, conforme a localização geográfica, entre o ambiente construído e pontos de ônibus.
- Para identificar o local para instalação de bicicletas, optou-se pela identificação de um tipo de material com a quantidade de vagas. Esse quantitativo é comparado com a quantidade de unidades (apartamentos) do ambiente construído para avaliar o mínimo necessário.
- A identificação de uma área de estacionamento classificada de forma específica é utilizada para a pontuação de veículos classificados como verdes.

- Assim como utilizado para avaliar o critério de veículos verdes que identifica uma área específica, a consulta elaborada para pontuar o mínimo necessário para espaço aberto também requer uma operação matemática.
- O critério para produção de energia renovável requer o cálculo de percentual entre a quantidade prevista de consumo e a quantidade de energia renovável a ser produzida. A partir deste percentual, a pontuação é realizada em três classificações.
- A classificação específica de materiais sustentáveis é aplicada para a pontuação de ingredientes de materiais.
- O critério de iluminação interna é pontuado pela igualdade da quantidade de lâmpadas de baixo consumo com a quantidade de espaços.

Tabela 15 – Critérios implementados

Critério para Certificação LEED	Inferência SPARQL
Localização do LEED Vizinhança (Bairros)	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> PREFIX uom: <http://www.opengis.net/def/uom/OGC/1.0/> PREFIX geo: <http://www.opengis.net/ont/geosparql#> PREFIX geof: <http://www.opengis.net/def/function/geosparql/> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> ""8""^xsd:decimal } WHERE { ?bd rdf:type sevim:BuildingCertified. ?local gufo:inheresIn ?bd. ?local sevim:asWkt ?g. ?build rdf:type sevim:Construction. ?locbuild gufo:inheresIn ?build. ?locbuild sevim:asWkt ?gb. ?w rdf:type sevim:NeighborhoodDevelopmentLocation. FILTER (geof:distance(?locbuild, ?gb, uom:metre) <= 1000) } </pre>
Acesso a Transporte de Qualidade	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> PREFIX uom: <http://www.opengis.net/def/uom/OGC/1.0/> PREFIX geo: <http://www.opengis.net/ont/geosparql#> PREFIX geof: <http://www.opengis.net/def/function/geosparql/> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "1"^xsd:decimal } WHERE { ?bus rdf:type sevim:BusStop. ?local gufo:inheresIn ?bus. ?local sevim:asWkt ?g. ?build rdf:type sevim:Construction. ?locbuild gufo:inheresIn ?build. ?locbuild sevim:asWkt ?gb. ?w rdf:type sevim:QualityTransport. FILTER (geof:distance(?locbuild, ?gb, uom:metre) <= 800) } </pre>
Instalações para Bicicletas	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> </pre>

	<pre> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#score> "1"^^xsd:decimal} WHERE { ?w rdf:type sevim:BicycleFacilities. ?bike rdf:type sevim:Material. sevim:RackBike sevim:isMaterialClassificationOf ?bike. ?v gufo:inheresIn ?bike. ?v gufo:hasQualityValue ?n. {SELECT (count(?s) as ?place) WHERE { ?s rdf:type sevim:Zone.} } } GROUP BY ?bike ?v ?n ?place HAVING (?place <= ?n) </pre>
Veículos Verdes	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> ""1"^^xsd:decimal } WHERE { ?res rdf:type sevim:Material. sevim:ChargeCar sevim:isMaterialClassificationOf ?res. ?w rdf:type sevim:GreenVehicle. } </pre>
Espaço Aberto	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "1"^^xsd:decimal } WHERE { ?res rdf:type sevim:Zone. sevim:Vegetacao sevim:isStyleZoneOf ?res. ?a gufo:inheresIn ?res. ?a gufo:hasQualityValue ?v. ?build rdf:type sevim:Construction. ?ab gufo:inheresIn ?build. ?ab rdf:type sevim:Area. ?ab gufo:hasQualityValue ?vb. ?w rdf:type sevim:OpenSpace. FILTER (?v/?vb > 0.3). } </pre>
Produção de Energia Renovável	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "1"^^xsd:decimal } WHERE { ?res rdf:type sevim:Construction. ?a gufo:inheresIn ?res. ?a gufo:hasQualityValue ?va. ?eq rdf:type sevim:Equipment. ?b gufo:inheresIn ?eq. ?b gufo:hasQualityValue ?vb. ?w rdf:type sevim:RenewableEnergyProduction. FILTER (?vb/?va <= 0.01). } INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "2"^^xsd:decimal } WHERE { ?res rdf:type sevim:Construction. ?a gufo:inheresIn ?res. ?a gufo:hasQualityValue ?va. ?eq rdf:type sevim:Equipment. ?b gufo:inheresIn ?eq. ?b gufo:hasQualityValue ?vb. ?w rdf:type sevim:RenewableEnergyProduction. FILTER (?vb/?va > 0.01). FILTER (?vb/?va <= 0.03). } INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "3"^^xsd:decimal } </pre>

	<pre> WHERE { ?res rdf:type sevim:Construction. ?a gufo:inheresIn ?res. ?a gufo:hasQualityValue ?va. ?eq rdf:type sevim:Equipment. ?b gufo:inheresIn ?eq. ?b gufo:hasQualityValue ?vb. ?w rdf:type sevim:RenewableEnergyProduction. FILTER (?vb/?va > 0.03). } </pre>
Divulgação e Otimização de Produto do Edifício – Ingredientes do Material	<pre> PREFIX sevim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "1"^^xsd:decimal } WHERE { SELECT (count(?y) as ?total) WHERE { ?m sevim:hasMaterial ?y. ?w rdf:type sevim:MaterialIngredients. {SELECT (count(?y) as ?certificate) WHERE { ?m rdf:type sevim:Material. sevim:Certified sevim:isMaterialClassificationOf ?m. ?c sevim:Description ?n. ?w rdf:type sevim:MaterialIngredients. } } } HAVING (?certificate/?total >= 0.25) } } </pre>
Iluminação Interna	<pre> PREFIX bim: <http://www.semanticweb.org/SEBIM#> PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#> PREFIX gufo: <http://purl.org/nemo/gufo#> INSERT {?w <http://www.semanticweb.org/SEBIM#Score> "1"^^xsd:decimal } WHERE { SELECT (count(?m) as ?total) WHERE { ?m rdf:type sevim:Material. sevim:DimmerSwitch sevim:isMaterialClassificationOf ?m. {SELECT (count(?s) as ?place) WHERE { ?s rdf:type sevim:Space. } } } HAVING (?place = ?total) } } </pre>

Fonte: Elaborado pelo autor.

A principal contribuição desta pesquisa é a exploração de uma solução para o complexo problema de organização das informações de um ambiente construído para a certificação LEED, bem fundamentada ontologicamente para fins de raciocínio, e a aplicação de inferências utilizando SPARQL. O processo de construção desta solução envolve fontes de dados heterogêneas como base para uma abordagem descentralizada e iterativa para o desenvolvimento. A construção do modelo conceitual é realizada a partir da análise de documentos normativos e modelos de ambientes construídos. Assim, o estudo envolve a obtenção do conhecimento teórico da área e a aplicação de métodos e ferramentas para representá-lo.

O processo de modelagem conceitual orientado pela ontologia ifcOWL e fundamentada em UFO apresenta uma estratégia de cima para baixo, que apoia o desenvolvimento de ontologias bem fundamentadas, reutilizando outras existentes validadas. O aspecto procedimental das regras para análise dos critérios é expresso por meio da integração da ontologia do domínio BIM com outras ontologias e uma linguagem para a aplicação das regras através da aplicação de uma abordagem de modelagem baseada em ontologia.

Na primeira experimentação realizada, buscou-se a abordagem baseada em ontologia monotônica, na qual a linguagem de regras SWRL foi selecionada para formalizar as regras para inferências das pontuações. Porém, esta abordagem apresentou algumas limitações, especialmente na modelagem de regras complexas e facilidade de manutenção. Assim, a implementação do modelo de raciocínio baseado em regras para o sistema de suporte à decisão, baseou-se na utilização de consultas SPARQL, com a geração de novas triplas para inferências sobre a pontuação de cada critério. As consultas para inserção de novas triplas se baseou no estudo de Bassiliades (2018) devido às restrições detectadas ao utilizar regras em SWRL, como obtenção de quantitativos, somatórios e subconsultas.

A validação por experimentação demonstrou maior facilidade de manutenção, bem como a integração das regras utilizando uma única linguagem. O modelo proposto por esta pesquisa permite a implementação de uma solução amigável para especialistas que desconhecem tecnologias semânticas. Sugere-se aqui a utilização de *frameworks* baseados em Java, como *JenaSemanticWeb*¹⁹ e *VirtuosoOpenSource*²⁰ que suportam funções GeoSPARQL e recursos SPIN para as inferências.

Para fins de comparação quanto ao tempo ganho por soluções tecnológicas como o artefato desenvolvido neste trabalho, destaca-se a experimentação prática com um grupo de 47 alunos do curso de Engenharia Civil da Universidade FUMEC. A atividade envolveu o levantamento e análise das informações para um único critério para certificação. Os alunos foram instruídos sobre o critério (Acesso a Transporte de Qualidade), bem como o direcionamento ao site da prefeitura de Belo Horizonte sobre os dados por região. A partir das instruções, os alunos levaram em média 22 minutos para concluir o atendimento ao critério escolhido. Diante disso, pode-se concluir que uma solução que organiza o conhecimento e permite a integração dos dados favorece à otimização do tempo de trabalho de um especialista.

¹⁹ <https://jena.apache.org/>

²⁰ <https://github.com/openlink/virtuoso-opensource>

Este experimento foi demonstrado para profissionais em arquitetura e engenharia. Após a apresentação desta proposta de solução, os participantes validaram positivamente e destacaram uma grande oportunidade de mercado para facilitar o processo de organização das informações e aumentar a quantidade de ambientes construídos certificados.

7.3 Adaptação em situações similares

Nesta seção é resolvido o Subproblema 14, do tipo predição, cujo enunciado é: Como o modelo criado poderia ser adaptado para outras situações similares? Esse subproblema é importante uma vez que remete a uma das etapas de validação interna e externa de um projeto, na condução da DSR na visão de Wieringa(2009), abordado no Capítulo 5.

Ao longo dos últimos anos, o crescimento exponencial da quantidade de informações disponíveis, decorrente de fatores como o desenvolvimento de novas tecnologias e novos processos, têm acarretado no aumento significativo da complexidade das atividades para a organização do conhecimento em ambientes organizacionais. Considerando o escopo de atuação da Ciência da Informação, os sistemas de organização do conhecimento são representações do conhecimento, modelos de abstração do mundo real, construídos para uma determinada finalidade. Esses sistemas também podem ser definidos como ferramentas que apresentam a interpretação organizada de estruturas do conhecimento, chamadas de ferramentas semânticas, por contemplar, essencialmente, conceitos e relações semânticas (Hjørland, 2008).

Diante do exposto, o artefato apresentado neste estudo apresenta características que o classificam como um sistema de organização do conhecimento. O seu processo de elaboração pode ser usado em outras pesquisas que buscam a integração semântica de diferentes conjuntos de dados, bem como soluções para automação de avaliações e apoio à tomada de decisão.

Cabe ainda destacar que, durante a experimentação, percebeu-se a necessidade de relacionar os dados à ontologia GeoSPARQL. O formato do dado geométrico não foi considerado pelo *script* de conversão de CSV para RDF, obrigando a uma intervenção para ajustar a ferramenta para atendimento deste quesito. Com as alterações identificadas, o *script* pode ser facilmente aplicado em outras situações com dados geométricos, sem a intervenção de um especialista em programação. Por fim, essa abordagem de conversão de dados tabulares em grafos de conhecimento demonstra que soluções envolvendo anotação semântica contribuem para a integração de diferentes fontes de dados em diferentes contextos.

O artefato proposto pode ser base para a automação na avaliação de projetos construtivos para autorização de construção nas prefeituras. Este é um exemplo que necessita de análises complexas e a interoperabilidade de diferentes fontes de dados. O processo atual ainda é burocrático e lento.

Outros sistemas de certificação sustentável também podem ser atendidos partindo de adaptações no artefato para atendimento aos critérios estabelecidos.

Utilizar uma ontologia de nível superior favorece a integração de conhecimento heterogêneo em várias ontologias. O modelo ontológico desenvolvido é um exemplo do uso de ontologias de alto nível como uma referência na definição de ontologias de domínio minimizando os erros ou inconsistências. Associado ao propósito de divulgação, o SEBIM faz parte do *Catalog for Ontology-Driven Conceptual Modeling Research*²¹, que é um catálogo estruturado e de código aberto que contém modelos de ontologias OntoUML e UFO, concebido para permitir o trabalho colaborativo e ser facilmente acessível a todos os seus usuários.

A gestão do conhecimento é um fator chave de sucesso para as organizações. A construção de sistemas de informação baseados em tecnologias semânticas favorece a descrição do conhecimento de uma forma processável e intercambiável por máquina.

²¹ <https://github.com/unibz-core/ontouml-models>

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as considerações da pesquisa. Os objetivos do trabalho são retomados e discutidos, bem como sua questão central. As questões desta pesquisa são analisadas, buscando apresentar a geração de novos conhecimentos, detalhando e analisando o rigor e a relevância desta tese. Por fim, os trabalhos futuros são apresentados para a continuidade desta pesquisa.

8.1 Cumprimento dos objetivos

A questão de pesquisa enunciada nesta tese foi “Como automatizar a avaliação para certificação LEED de projetos construtivos através de tecnologias semânticas?”. Esta questão de natureza teórica e prática foi desdobrada em subproblemas, conforme apresentado no Capítulo 5, e para obter respostas, foram definidos os objetivos geral e específicos.

Para o cumprimento do objetivo geral da tese, considera-se que a especificação do modelo preliminar para automação da avaliação para certificação é capaz de melhorar os resultados das avaliações. Isso é confirmado através de um levantamento detalhado sobre o processo e as dificuldades encontradas para se ter uma melhor organização e análise dos dados, e com a experimentação inicial mostrando como o modelo proposto pode resolver tais dificuldades de forma satisfatória.

Os objetivos específicos, que são base para o alcance do objetivo geral, foram cumpridos. A metodologia *Design Science* foi aplicada para a estruturação da pesquisa em problemas teóricos e práticos. Ressalta-se que esta escolha demonstra a importância do método DSR como uma alternativa metodológica, pois facilita o processo de desenvolver uma pesquisa que envolva a concepção de artefatos, discutindo as questões teóricas envolvidas e gerando novos conhecimentos para a área.

Para aprofundar o entendimento do problema relacionado à certificação LEED foi realizado um levantamento do referencial teórico sobre o processo e as dificuldades para avaliação, bem como as tecnologias envolvidas como o BIM, e outras tecnologias que envolvem a proposta desta pesquisa, sendo a anotação semântica de dados abertos e o emprego de inferências em grafos de conhecimento.

Durante este levantamento foi possível perceber que faltam ferramentas computacionais potenciais para facilitar a adoção do BIM verde. Observou-se lacunas sobre as complicações dos modelos BIM como a complexidade na sua estrutura de dados,

interoperabilidade fraca e falta de padrão para os variados aspectos das aplicações para BIM verde.

Diante dessas percepções, foi proposto um modelo de aplicação ontológica para integração semântica e realização de inferências conforme os critérios para certificação LEED. O atendimento dos critérios envolve o entendimento de suas regras e a busca pelos dados em um modelo BIM ou em outros conjuntos de dados, como dados sobre o entorno.

A inserção de dados de um modelo BIM e a integração com dados obtidos no *site* da prefeitura de Belo Horizonte formaram a base para a validação do artefato criado. Seguindo o ciclo regulador de (Wieringa, 2009) foi aprimorado o artefato, uma vez que a primeira tentativa envolveu a aplicação de regras em SWRL. A partir da avaliação desta implementação, identificou-se a dificuldade no atendimento de análises mais complexas e, até mesmo, a manutenção da solução inicial. Assim, uma nova solução envolveu a aplicação de consultas SPARQL.

No contexto da ontologia, a fundamentação em UFO visou alcançar maior interoperabilidade e consistência dos conceitos definidos no IFC. Procurou-se explorar características de cada conceito para estabelecer as correlações, bem como persistir a informação com mais semântica. Uma vez estabelecida a versão fundamentada da ontologia, uma nova prototipação foi realizada para validação. Essas iterações favoreceram ajustes necessários e melhor compreensão do contexto e dos valores que essa solução pode agregar ao usuário final.

Durante as experimentações, percebeu-se que existe a necessidade de utilizar parâmetros que comprovem a redução de prejuízos ambientais e econômicos. Tais comprovações necessitam de simulações em ferramentas computacionais que exigem a exportação e a importação do arquivo IFC. Este processo de transferência de dados pode causar perda de dados, bem como, a ferramenta de simulação, apresentar resultados gráficos, sem o registro no IFC. Diante dessa limitação, as consultas relacionadas a este propósito foram simplificadas para exemplificação das inferências.

Por fim, verificou-se a generalização do problema, cumprindo o último objetivo específico. As principais contribuições generalizáveis da tese foram: especificação de uma abordagem genérica para integração, construção de uma ontologia bem fundamentada; anotação semântica e inferências de dados; aplicação de dados geométricos espaciais para consultas sobre localização em grafos e; organização de dados para geração de novos conhecimentos.

8.2 Geração de novos conhecimentos

Para o processamento de dados na indústria da construção, recursos para inferência e raciocínio de RDF e OWL podem ser realizados por meio de ferramentas gratuitas no mercado. A conversão dos dados BIM em ontologia proporciona melhor integração e recuperação de informações para a geração de conhecimentos. A prática realizada neste estudo demonstra tais benefícios e apresenta novas perspectivas que podem auxiliar na melhor utilização do BIM, principalmente no Brasil, que ainda está na fase inicial de implantação.

Apesar do objetivo desta pesquisa em atender os critérios para a certificação LEED, pode-se generalizar esta abordagem genérica em muitos casos de uso diferentes, incluindo, por exemplo, colaboração de vários modelos, estimativa de quantidade e custo, verificação de conformidade de requisitos, validação de dados simples, etc. O SPARQL, como um padrão W3C, foi implementado para permitir várias interfaces de programação de aplicativos RDF e bancos de dados, que oferecem suporte a funções estendidas.

A aplicação de inferências demonstra viabilidade em outras pesquisas que necessitam de análises sobre quantitativos. Critérios que consideram a soma das metragens ou quantidade de um determinado material para obtenção da pontuação utilizam recursos SPARQL, bem como funções de geolocalização com GeoSparql para inserção de novas triplas à base de dados. Portanto, várias soluções podem ser usadas para implementar ferramentas de apoio à decisão, tanto na área da construção civil, quanto em outras áreas. Considera-se que a criação de consultas SPARQL favorece mais possibilidades se comparado com a adoção de regras em SWRL.

Os grafos de conhecimento resultantes podem ser publicados como parte de uma nuvem de dados vinculada e processados pelas tecnologias da Web Semântica. A disponibilização deste serviço ao público proporcionaria um sistema de informações com dados de ambientes construídos integrados a outros dados. Essa solução inclui plataformas de publicação abertas para armazenamento das triplas, serviços de consulta e mecanismos de inferência para raciocínio. Conciliado à fundamentação em UFO, a interoperabilidade com outras ontologias é mais viável.

Conforme o relato obtido na apresentação a engenheiros e arquitetos, a aplicação da abordagem baseada em BIM e tecnologias web, fornecendo dados apropriados no desenvolvimento de um ambiente ecologicamente correto, pode facilitar os profissionais da indústria, independentemente de suas origens ou experiência, na previsão de resultados de minimização de impactos ambientais no ciclo de vida do projeto de construção.

Portanto, este estudo pode ser considerado como um recurso para a gestão do conhecimento para a certificação LEED. O artefato proposto contribui como uma base para a organização de informações que pode ser atualizada por outras fontes de informações para agregar valor no estudo e na coleta de informações para avaliação de ambientes construídos. Agentes podem ser utilizados para auxiliar o processo de atualização e geração de novos conhecimentos sobre o projeto de construção civil.

Conforme apresentado na tabela 3, existem sistemas de classificação para construções verdes e a escolha do melhor método deve levar em consideração o empreendimento e o local de implantação. A escolha pela Certificação LEED deve-se aos seus requisitos estarem relacionados com a inovação e créditos de prioridade regional que abrangem as diferenças ambientais, sociais e econômicas existentes em cada local, os quais não são abordados em outros sistemas como na Certificação AQUA. A adoção do sistema de classificação LEED, de abrangência internacional e adotado em outras pesquisas, visa à melhoria das condições ambientais relacionadas ao meio ambiente.

A abordagem de soluções para apoio de construções sustentáveis contribui ambientalmente apoiada no uso racional e redução dos recursos naturais, busca na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e incentiva a utilização de materiais e tecnologias de baixo impacto ambiental.

Como contribuição no âmbito social, estudos como este ajudam na conscientização de profissionais e pesquisadores no aumento do senso de comunidade, promove o aumento da produtividade em processos da indústria da construção e, principalmente, incentiva uma maior responsabilidade socioambiental.

Como contribuição científica, este trabalho foi divulgado em congressos, seminários e revistas científicas (Bax & Silva, 2020, 2021; Silva et al., 2019; Silva & Bax, 2020, 2021, 2022). Além disso, a ontologia criada foi licenciada e incluída no *Catalog for Ontology-Driven Conceptual Modeling Research*²², que é um catálogo estruturado e de código aberto que contém modelos de ontologias OntoUML e UFO.

8.3 Trabalhos futuros

Experimentações das ideias aqui desenvolvidas em projetos comerciais de maior complexidade poderão proporcionar o refinamento das consultas para a implementação de um sistema eficiente para automação de certificação LEED. O conjunto de informações documentadas é vasto e exige um processo que garanta autenticidade e auditoria. A

²² <https://purl.org/ontouml-models>

experimentação com outros projetos permite o refinamento e a possibilidade de uma construção de um software maduro para adoção em organizações da construção civil. Além disso, a adaptação para outros sistemas de certificação proporcionará o enriquecimento da ontologia para a organização de informações para ambientes construídos sustentáveis.

A adoção de soluções apoiadas na sustentabilidade pode viabilizar estudos que avaliem como as certificações podem proporcionar maior viabilidade no âmbito financeiro e tributário.

A ontologia foi concebida considerando a integração com outros dados, além dos dados de entorno utilizados. A utilização de conjuntos de dados sobre o detalhamento de materiais permite uma melhor análise de suas composições e origens. Para o atendimento aos demais critérios, dados externos vão agregar valor à análise para certificação.

O desenvolvimento de um protótipo que exemplifique a publicação de dados em nuvem e a utilização acessível aos especialistas também é uma possibilidade. Esta ferramenta pode ser uma alternativa importante para maior abrangência do artefato e geração de novos conhecimentos.

Novas pesquisas para refinamento da ontologia SEBIM podem ser realizadas para promover a integração com outras ontologias, como soluções envolvendo Internet das Coisas e Cidades Inteligentes.

REFERÊNCIAS

- Almeida, J. P. A., Falbo, R. A., Guizzardi, G., & Sales, T. P. (2020). *gUFO: A Lightweight Implementation of the Unified Foundational Ontology (UFO)* (Issue March).
- Arp, R., Smith, B., & Spear, A. D. (2015). *Building Ontologies with Basic Formal Ontology*. The MIT Press.
- Azhar, S., Carlton, W. A., Olsen, D., & Ahmad, I. (2011). Automation in Construction Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Automation in Construction*, 20(2), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.019>
- Baader, F., Calvanese, D., McGuinness, D. L., McGuinness, D. L., Nardi, D., & Patel-Schneider, P. F. (2007). *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*. Cambridge University Press.
- Baracho, R. M. A., Pereira, M. L., & Almeida, M. B. (2017). Ontologia, Internet das Coisas e Modelagem da Informação da Construção (BIM): Estudo Exploratório e a Inter-relação entre as Tecnologias. *CEUR Workshop Proceedings, 1908*, 141–146.
- Bassiliades, N. (2018). SWRL2SPIN: converting SWRL to SPIN. *CEUR Workshop Proceedings, 2204*.
- Bax, M. P. (2013). Design science: filosofia da pesquisa em ciência da informação e tecnologia Design science: philosophy of research in information science and technology. *Ci. Inf.*, 42(2), 298–312.
- Bax, M. P., & Silva, C. G. T. (2020). Integração de Dados usando Ontologias e Regras Lógicas para Automação da Certificação LEED de Projetos da Construção Civil. *Ontobras*.
- Bax, M. P., & Silva, C. G. T. (2021). Modelagem do conhecimento usando ontologias para avaliar a sustentabilidade de projetos construtivos. *Ontobras 2021*, 7.

- Borgo, S., & Masolo, C. (2009). Foundational choices in DOLCE. In *Handbook on Ontologies* (Issue May 2009). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3>
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (2018). Building information modeling: Technology Foundations and Industry Practice. In *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_1
- Coppens, S., Van Der Sande, M., Verborgh, R., Mannens, E., & Van De Walle, R. (2013). Reasoning over SPARQL. *CEUR Workshop Proceedings*, 996.
- Costa, M. L. da S., Almeida, M., Cunha, R. D. A., & Cesar, S. F. (2021). Estudo comparativo entre as normas ISO 21931:2010, NBR 15575 e os requisitos das Certificações AQUA e LEED / Comparative study between ISO 21931:2010, NBR 15575 and the requirements of AQUA and LEED Certifications. *Brazilian Journal of Development*, 7(11), 105727–105740. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-282>
- Creswell, J. W. (2014). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. In *SAGE*.
- Curry, E., O'Donnell, J., Corry, E., Hasan, S., Keane, M., & O'Riain, S. (2013). Linking building data in the cloud: Integrating cross-domain building data using linked data. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.10.003>
- Dahlberg, I. (2006). Knowledge organization: A new science? *Knowledge Organization*, 33(1), 11–19.
- de Farias, T. M., Roxin, A., & Nicolle, C. (2015). IfcWoD, Semantically Adapting IFC Model Relations into OWL Properties. *Proc. of the 32nd CIB W78 Conference*, 1–86.
- Ding, L., Lebo, T., Erickson, J. S., Difranzo, D., Williams, G. T., Li, X., Michaelis, J., Graves, A., Zheng, J. G., Shangguan, Z., Flores, J., McGuinness, D. L., & Hendler, J. A. (2011). TWC LOGD: A portal for linked open government data ecosystems.

Journal of Web Semantics, 9(3), 325–333.
<https://doi.org/10.1016/j.websem.2011.06.002>

Dresch, A., Lacerda, D. P., & Antunes Junior, J. A. V. (2015). Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement. In *Springer*.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102220-7.00011-X>

DuCharme, B. (2013). Learning SPARQL: Querying and Updating with SPARQL 1.1. In *O'Reilly Media, Inc.* (Issue Second Edition). O'Reilly Media, Inc.
<https://doi.org/10.7771/1481-4374.1572>

Eiter, T., Ianni, G., Krennwallner, T., & Polleres, A. (2008). Rules and Ontologies for the Semantic Web. *Reasoning Web*, 1–53. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85658-0_1

Elkington, J. (1998). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone.

Eснаоla-gonzalez, I., Bermúdez, J., Fernandez, I., & Arnaiz, A. (2018). Semantic Prediction Assistant Approach applied to Energy Efficiency in Tertiary Buildings. *Semantic Web*, 9, 735–762.

Falbo, R. de A. (2014). SABiO: Systematic approach for building ontologies. *CEUR Workshop Proceedings*, 1301(February).

Farinelli, F., & Souza, A. D. (2021). Ontologias de alto nível: porque precisamos e como usar. *FRC: Front. Repr. Conh.*, 1(1), 174–202.

Gearon, P., Passant, A., & Polleres, A. (2013). *SPARQL 1.1 Update*. W3C Recommendation. <https://www.w3.org/TR/sparql11-update/>

Geyer, P. (2012). Advanced Engineering Informatics Systems modelling for sustainable building design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(4), 656–668.
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.04.005>

Gil, A. C. (2008). *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social* (Atlas, Ed.; 6th ed.). Atlas.

- Gomez-Perez, J. M., Pan, J. Z., Vetere, G., & Wu, H. (2017). Exploiting Linked Data and Knowledge Graphs. In *Springer*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45654-6_5
- Gómez-Romero, J., Bobillo, F., Ros, M., Molina-Solana, M., Ruiz, M. D., & Martín-Bautista, M. J. (2015). A fuzzy extension of the semantic Building Information Model. *Automation in Construction*, *57*, 202–212. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.007>
- Gruber, T. R. (1993). A Translation Approach to Portable Ontology Specifications. *Knowledge Aquisition*, *5*(2), 199–220.
- Grünberg, P. R. M., Medeiros, M. H. F. de, & Tavares, S. F. (2014). Certificação ambiental de habitações: comparação entre LEED for Homes, Processo Aqua e Selo Casa Azul. *Ambiente & Sociedade*, *17*(2), 195–214. <https://doi.org/10.1590/s1414-753x2014000200013>
- Guizzardi, G. (2005). *Ontological Foundations for Structural Conceptual Models*.
- Guizzardi, G., Almeida, J. P., Guizzardi, R. S. S., Barcellos, M. P., & Falbo, R. (2011). Ontologias de fundamentação, modelagem conceitual e interoperabilidade semântica. *CEUR Workshop Proceedings*, *728*(i).
- Guizzardi, G., Falbo, R. A., & Guizzardi, R. S. S. (2008). A importância de ontologias de fundamentação para a engenharia de ontologias de domínio: o caso do domínio de processos de software. *IEEE Latin America Transactions*, *6*(3), 244–251. <https://doi.org/10.1109/TLA.2008.4653854>
- Guizzardi, G., Wagner, G., Almeida, J. P. A., & Guizzardi, R. S. S. (2015). Towards ontological foundations for conceptual modeling: The unified foundational ontology (UFO) story. *Applied Ontology*, *10*(3–4), 259–271. <https://doi.org/10.3233/AO-150157>
- Hawke, S., Herman, I., Parsia, B., Polleres, A., & Seaborne, A. (2013). *SPARQL 1.1 Entailment Regimes*. W3C Recommendation. <https://doi.org/10.1201/b10967>

- Hevner, A. R. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2), 87–92. <https://doi.org/http://aisel.aisnet.org/sjis/vol19/iss2/4>
- Hevner, A. R., & Chatterjee, S. (2010). Design Research in Information Systems: Theory and Practice. In *Springer* (Vol. 22).
- Hjørland, B. (2002). Domain analysis in information science: Eleven approaches - Traditional as well as innovative. *Journal of Documentation*, 58(4), 422–462. <https://doi.org/10.1108/00220410210431136>
- Hjørland, B. (2004). Domain Analysis: A Socio-Cognitive Orientation for Information Science Research. *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, 30(3), 17–21.
- Hjørland, B. (2008). What is Knowledge Organization (KO)? *Knowledge Organization*, 35(2/3), 86–101.
- Hjørland, B. (2017). Reviews of concepts in knowledge organization. *Knowledge Organization*, 44(5), 349–379. <https://doi.org/10.5771/0943-7444-2017-5-349>
- Hjørland, B. (2021). Information retrieval and knowledge organization: A perspective from the philosophy of science. *Information (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/info12030135>
- Hjørland, B., & Albrechtsen, H. (1995). Toward a new horizon in information science: Domain-analysis. *Journal of the American Society for Information Science*, 46(6), 400–425. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4571\(199507\)46:6<400::AID-ASI2>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199507)46:6<400::AID-ASI2>3.0.CO;2-Y)
- Hong, S.-H., Lee, S.-K., & Yu, J.-H. (2019). Automated management of green building material information using web crawling and ontology. *Automation in Construction*, 102(September), 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.015>

- Horrocks, I., Patel-Schneider, P. F., Bechhofer, S., & Tsarkov, D. (2005). OWL rules: A proposal and prototype implementation. *Web Semantics*, 3(1), 23–40. <https://doi.org/10.1016/j.websem.2005.05.003>
- Horrocks, I., Patel-Schneider, P. F., Boley, H., Tabet, S., Grosz, B., & Dean, M. (2004). *SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML*. W3C Recommendation. <https://www.w3.org/Submission/SWRL/>
- Isotani, S., & Bittencourt, I. I. (2015). Dados Abertos Conectados. In *NÚCLEO DE INFORMAÇÃO E COORDENAÇÃO DO PONTO Br – NIC.br Centro de Estudos sobre Tecnologia Web – CeWeb.br*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4355.6329>
- Jeremy Tandy, Herman, I., & Kellogg, G. (2015). *Generating RDF from Tabular Data on the Web*. W3C Recommendation. <https://www.w3.org/TR/csv2rdf/>
- Jiang, S., Wang, N., & Wu, J. (2018). Combining BIM and Ontology to Facilitate Intelligent Green Building Evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(5), 1–15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000786](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000786)
- John, V. M., & Prado, R. T. A. (2010). Boas práticas para habitação mais sustentável. In *Selo Azul Caixa: Boas práticas para habitação mais sustentável*.
- Kamsu-Foguem, B., Abanda, F. H., Doumbouya, M. B., & Tchouanguem, J. F. (2019). Graph-based ontology reasoning for formal verification of BREEAM rules. *Cognitive Systems Research*, 55(October 2012), 14–33. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.12.011>
- Keet, C. M. (2018). *An Introduction to Ontology Engineering*.
- Kreider, R. G. (2013). *An Ontology of the Uses of Building Information Modeling*. Pennsylvania State University.
- Krijnen, T., & Beetz, J. (2018). A SPARQL query engine for binary-formatted IFC building models. *Automation in Construction*, 95(August), 46–63. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.014>

- Krötzsch, M., Simančík, F., & Horrocks, I. (2014). A description logic primer. *Perspectives on Ontology Learning*, 18(June), 3–20.
- Lawan, A., & Rakib, A. (2019). *The Semantic Web Rule Language Expressiveness Extensions-A Survey*.
- Liebich, T., Adachi, Y., Forester, J., Hyvarinen, J., Richter, S., Chipman, T., Weise, M., & Wix, J. (2013). *Industry Foundation Classes Release 4 (IFC4)*. <https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4/FINAL/HTML/>.
- Lu, Y., Wu, Z., Chang, R., & Li, Y. (2017). Building Information Modeling (BIM) for green buildings : A critical review and future directions. *Automation in Construction*, 83(February), 134–148. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024>
- Ma, Z., Zhang, F., Yan, L., & Cheng, J. (2014). *Fuzzy Knowledge Management for the Semantic Web Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Springer.
- Marconi, M., & Lakatos, E. (2003). Fundamentos de metodologia científica. In *Editora Atlas S. A.* <https://doi.org/10.1590/S1517-97022003000100005>
- Marek Suchánek. (2021). *OntoUML specification Documentation*.
- Niknam, M., & Karshenas, S. (2015). Sustainable Design of Buildings using Semantic BIM and Semantic Web Services. *Procedia Engineering*, 118, 909–917. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.530>
- Niknam, M., & Karshenas, S. (2017). Automation in Construction A shared ontology approach to semantic representation of BIM data. *Automation in Construction*, 80, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.03.013>
- Noy, N. F., & McGuinness, D. L. (2001). Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. In *Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880*. <https://doi.org/10.1007/s00607-018-0687-5>

- Pauwels, P., Meyer, R. De, & Campenhout, J. Van. (2011). Interoperability for the Design and Construction Industry through Semantic Web Technology. *Semantic Multimedia*, 143–158. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-23017-2>
- Pauwels, P., & Roxin, A. (2016). SimpleBIM: From full ifcOWL graphs to simplified building graphs. *European Conference on Product & Process Modelling, September*.
- Pauwels, P., & Terkaj, W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Automation in Construction*, 63, 100–133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.12.003>
- Perry, M., & Herring, J. (2011). *GeoSPARQL - A geographic query language for RDF data*. Open Geospatial Consortium. <http://www.opengeospatial.org/legal/>.
- Poveda-Villalón, M., Suárez-Figueroa, M. C., & Gómez-Pérez, A. (2015). Did you validate your ontology? OOPS! *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7540, 402–407. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46641-4_35
- PROCEL. (2005). *Manual de Instruções*. <http://www.procelinfo.com.br/>
- Rashid, S. M., McCusker, J. P., Pinheiro, P., Bax, M. P., Santos, H., Stingone, J. A., Das, A. K., & McGuinness, D. L. (2020). The Semantic Data Dictionary – An Approach for Describing and Annotating Data. *Data Intelligence*, 443–486. https://doi.org/10.1162/dint_a_00058
- Rasmussen, M. H., Frausing, C. A., Hviid, C. A., & Karlshøj, J. (2018). Demo: Integrating building information modeling and sensor observations using semantic web. *CEUR Workshop Proceedings*, 2213, 48–55.
- Rasmussen, M. H., Lefrançois, M., Pauwels, P., Hviid, C. A., & Karlshøj, J. (2019). Managing interrelated project information in AEC Knowledge Graphs. *Automation in Construction*, 108(August), 102956. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102956>

- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Sakr, S., Wylot, M., Mutharaju, R., Le Phuoc, D., & Fundulaki, I. (2018). Linked data: Storing, querying, and reasoning. In *Linked Data: Storing, Querying, and Reasoning*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73515-3>
- Shu, Y. (2018). A practical approach to modelling and validating integrity constraints in the Semantic Web. *Knowledge-Based Systems*, 153, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.04.021>
- Silva, C. G. T., & Bax, M. P. (2020). Integração de dados usando ontologias e inferências para automação da certificação LEED de projetos da construção civil. *FEISC*.
- Silva, C. G. T., & Bax, M. P. (2021). Tecnologias semânticas para avaliar projetos construtivos sustentáveis. *XXI ENANCIB*.
- Silva, C. G. T., & Bax, M. P. (2022). Domain Analysis To Assess the Sustainability of Construction Projects Using Semantic Technologies. *BRAJIS*, 16(1), 1–26. <https://doi.org/10.36311/1981-1640.2022.v16.e02144>
- Silva, C. G. T., Bax, M. P., & Baracho, R. M. A. (2019). Recuperação de imagens na modelagem de informação da construção: uma revisão. *XX ENANCIB*, 1–18.
- Simon, H. A. (1996). The Sciences of the Artificial. In *MIT Press* (Vol. 11, Issue 1). MIT Press. <https://doi.org/10.2307/3102825>
- Smiraglia, R. P. (2015). Domain Analysis for Knowledge Organization: Tools for Ontology Extraction. In *Domain Analysis for Knowledge Organization* (Chandos Pu). Oxford.
- Smith, B. (2004). Beyond Concepts : Ontology as Reality Representation. *Proceedings of FOIS, November*, 1–12.

- Sugahara, E. S., Freitas, M. R. de, & Cruz, V. A. L. da. (2021). Análise das certificações ambientais de edificações: AQUA, PROCEL, LEED e Casa Azul. *Interação - Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 23(1), 12–24.
- Terkaj, W., & Pauwels, P. (2017). A method to generate a modular ifcOWL ontology. *CEUR Workshop Proceedings*, 2050.
- Terkaj, W., & Sojic, A. (2015). Ontology-based representation of IFC EXPRESS rules: An enhancement of the ifcOWL ontology. *Automation in Construction*, 57(May), 188–201. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.010>
- USGBC. (2020). LEED V4.1: Building Design and Construction. *US GREEN BUILDING COUNCIL*, January, 259.
- Vanzolini, F. (2022). *A Certificação AQUA-HQE*. <https://vanzolini.org.br/>
- W3C OWL Working Group. (2012). *OWL 2 Web Ontology Language Document Overview*. W3C Recommendation. <http://www.w3.org/TR/owl2-overview/>
- Wieringa, R. (2009). Design science as nested problem solving. *Proceedings of the 4th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology, DESRIST '09*. <https://doi.org/10.1145/1555619.1555630>
- Williams, H. (2018). *Virtuoso GeoSPARQL Demo Server*. OpenLink Software. <https://community.openlinksw.com/t/virtuoso-geosparql-demo-server/223>
- Wong, J. K. W., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, 57, 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- Xiao, X., Skitmore, M., Li, H., & Xia, B. (2019). Mapping knowledge in the economic areas of green building using scientometric analysis. *Energies*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/en12153011>
- Xu, Z., Wang, X., Zhou, W., & Yuan, J. (2019). Study on the Evaluation Method of Green Construction Based on Ontology and BIM. *Hindawi*, 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2019/5650463>

- Yan, J., Wang, C., Cheng, W., Gao, M., & Zhou, A. (2018). A retrospective of knowledge graphs. *Frontiers of Computer Science*, 12(1), 55–74. <https://doi.org/10.1007/s11704-016-5228-9>
- Zhang, C., & Beetz, J. (2016). *Querying Linked Building Data Using SPARQL with Functional Extensions*. September, 9.
- Zhang, C., Beetz, J., & De Vries, B. (2018). BimSPARQL: Domain-specific functional SPARQL extensions for querying RDF building data. *Semantic Web*, 9(6), 829–855. <https://doi.org/10.3233/SW-180297>
- Zhang, D., Zhang, J., Guo, J., & Xiong, H. (2019). A semantic and social approach for real-time green building rating in BIM-based design. *Sustainability (Switzerland)*, 11(14), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su11143973>