

Arquitetura para Construção de Índices Ambientais Apoiada por Ontologias: um Estudo Exploratório sobre Qualidade do Ar

Mateus G. Belizario¹, Ricardo M. Taques², Elizziane M. B. Farias², Cesar A. Tacla^{1,2}, Rita C. Berardi¹

¹Departamento de Informática – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR),
CEP 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI)
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
CEP 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

{mateusbelizario, rtaques, elizzianefarias}@alunos.utfpr.edu.br,
{tacla, ritaberardi}@utfpr.edu.br

Abstract. *Public policy-making often comes from a participatory process. Thus, this project proposes the development of an architecture that allows users, both citizens and managers, to build their own environmental indexes, monitor them in real time and publish them in an open format. It is intended to allow citizens to be able to monitor the level of pollution in the region in which they live without requiring access to specific data provided by institutions holding the information. To achieve these objectives, an architecture is proposed that uses an ontology as a way to define a common vocabulary and to allow the semantic relationship of the data.*

Resumo. *A elaboração de políticas públicas, muitas vezes, provém de um processo participativo. Assim, este projeto propõe o desenvolvimento de uma arquitetura que permita a usuários, tanto cidadãos quanto gestores, construir seus próprios índices ambientais, monitorá-los em tempo real e publicá-los em formato aberto. Pretende-se conceder aos cidadãos a possibilidade de acompanhar o nível de poluição da região em que têm interesse sem necessitar requisitar acesso a dados específicos fornecidos por instituições detentoras da informação. Para alcançar esse objetivo, propõe-se uma arquitetura que utiliza ontologias como forma de definir vocabulários e assim permitir o relacionamento semântico dos dados.*

1. Introdução

Segundo Lemos (2013), o conceito de cidades inteligentes surge com o intuito de incentivar o ambiente público na tomada de decisões, ampliar os laços comunitários e a participação política. O cenário potencial onde se insere o problema abordado neste artigo é um no qual a tecnologia pode contribuir neste aumento de participação permitindo uma melhora no monitoramento e controle da poluição ambiental o que pode atenuar os danos ao meio ambiente. Apesar de todos os possíveis benefícios que a aplicação do conceito de cidades inteligentes possui no que tange ao monitoramento de agentes poluentes em centros urbanos, existem obstáculos que dificultam a coleta, manipulação e inferência de

informação sobre este grande número de dados. Quando o foco é o sensoriamento de indicadores ambientais, uma das problemáticas estudadas é a dificuldade de se encontrar dados abertos para livre acesso e processamento. E quando eles existem, são disponibilizados em formatos muito distintos e sem padronização para coleta e análise, assim exige um grande esforço para conseguir relacionar e extrair informações deste material.

Tendo em vista o cenário de indicadores ambientais e a problemática apontada, propomos uma arquitetura que visa realizar o tratamento de dados oriundos de sensores de forma semântica, com o objetivo de relacioná-los e conectá-los, gerando informações úteis a partir desses dados e disponibilizando-as para o uso por diferentes tipos de usuários. Além disso, com essa arquitetura, os usuários finais poderão compor novos índices de controle e acompanhamento a partir do tratamento semântico aplicado sobre os dados de medições previamente incorporados em seu modelo ontológico.

A proposta descrita passou por uma primeira fase de desenvolvimento, através da qual foi possível realizar um estudo exploratório com dados de sensores de qualidade de ar inspirados nos cenários de uso do IAP (Instituto Ambiental do Paraná). Esse estudo exploratório ajudou a visualizar os desafios relacionados ao monitoramento de dados em cidades inteligentes, e compreender o contexto no qual ele é aplicado.

Este artigo está organizado como segue. Na seção 2, outras propostas de sistemas de monitoramento são apresentadas juntamente com suas arquiteturas. A seção 3 apresenta a arquitetura proposta por esta pesquisa e como ela foi utilizada em um estudo exploratório. Na seção 4 são compartilhados os resultados alcançados com a arquitetura proposta por meio de um estudo exploratório. Na seção 5 são expostas as discussões advindas da execução deste projeto, as conclusões sobre ele e por fim apresentamos possibilidades para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Correlatos

Diversas cidades têm utilizado sistemas de monitoramento a partir de sensores ou dispositivos de coleta de dados para obtenção de informações relevantes sobre o meio ambiente, para controlar ou mesmo antecipar o surgimento de problemas. Dentre eles, encontramos projetos que procuram soluções para um tráfego urbano mais eficiente, para controle da qualidade da água ou da qualidade do ar nas regiões com muito tráfego de veículos ou próximas de indústrias e fábricas.

Assim, foram estudadas arquiteturas em trabalhos correlatos que fazem uso ou não de ontologias com o intuito de compreender como ocorre o tratamento de dados gerados por sensores para a geração da informação e, como são compartilhados estes dados com os usuários.

2.1. Arquitetura de sistemas de monitoramento para *Smart Cities*

No projeto descrito por Montori et al. (2017), a arquitetura SenSquare tem a finalidade de tratar medições do ambiente originadas de dispositivos diversos, de fontes confiáveis ou não que são armazenadas em um formato padronizado, acrescidas de metadados e referências espaço-temporais. Em seu módulo principal de processamento são incorporados outros dados referentes aos dispositivos e usuários que participaram das coletas em sua base de dados. Para exteriorizar resultados, esta arquitetura utiliza-se de

APIs para controlar o acesso e a disponibilização de informações na nuvem em modo *open data* para uso por serviços *web* ou *mobile*.

Shahanas e Bagavathi (2016) apresentam um sistema de gerenciamento da qualidade da água. Sua arquitetura faz uso de sensores pelos quais os dados são coletados e transmitidos para um servidor Arduino e Raspberry Pi. Na sua camada intermediária são executados scripts para analisar e gerar resultados que são compartilhados via SMS ou correio eletrônico. Os dados advêm de sensores em PoU (*Points of Use*) dentro de reservatórios de água, são depois carregados em uma base MySQL e scripts os processam gerando alertas e relatórios. Ademais uma interface web foi criada para apresentar informações sobre as condições da água.

Uma solução semelhante é vista em Yuntao et al. (2016). Sua arquitetura é hierarquicamente dividida em quatro camadas, cada qual responsável por funções específicas. Em sua base estão dispostos os sensores sobrepostos por uma rede física e uma rede sem fio que faz uso de um framework complexo para capturar dados somente de sensores, estáticos ou móveis. Além disso, outros módulos realizam simulações, diagnósticos, emitem alertas prévios, enviam dados de ajustes para os reservatórios, elaboram planos de emergência para incidentes que são direcionados para componentes do sistema. Seu objetivo principal é permitir um controle eficiente das condições da água em todo o sistema hidráulico envolvido.

2.2. Arquiteturas que utilizam ontologias no monitoramento ambiental

Com outro tipo de abordagem, Claudine et al. (2012) propõem em seu projeto, para uso em cidades inteligentes, uma ontologia chamada de OUPP (*Ontology of Urban Planning Process*) utilizada em conjunto com a ontologia CityGML (OGC, 2006). Este projeto serve para analisar as condições do ar em um ambiente urbano a partir das relações semânticas entre estes dois modelos. Em sua modelagem, OUPP contempla conceitos e axiomas ligados aos fatores do clima como temperatura e vento. Na modelagem presente em CityGML¹ estão conceituados os elementos geométricos de uma cidade, como ruas e edificações. Com o alinhamento semântico entre as ontologias tornou-se possível auxiliar na melhoria do controle de poluição do ar em espaços urbanos. Entretanto, não são descritos aspectos da arquitetura utilizada no projeto que nos impede saber como os dados recebidos são tratados e como são disponibilizados.

Outra proposta que faz uso de ontologias para monitoramento ambiental é descrita em Oprea (2005) em seu sistema especialista chamado de SBC_MEDIU. Sua arquitetura é composta de uma base de conhecimento, uma máquina de inferência e de uma base de dados com padrões e medições armazenadas em séries temporais. Em seu módulo sobre poluição do ar denominado por SBC_AIR ocorre o uso da base de conhecimento implantada pelo sistema DIAGNOZA_MEDIU. Este *framework* atua sobre os dados, regras e parâmetros realizando avaliações para produzir diagnósticos como o estado e o risco de poluição do ar, além de sugerir soluções preventivas. Quatro anos depois, Oprea (2009) incorporou o uso de uma ontologia de domínio para fazer as análises e o controle de poluição do ar em regiões urbanas com atividades industriais denominada de

¹ Disponível em <https://www.citygml.org/>

AIR_POLLUTION_Onto. Para o desenvolvimento desta ontologia foram identificados termos específicos como *Pollutant*, *Pollution_Source*, *Emission*, *CO*, *SO₂*, *NO₂*, *O₃*, *PM₁₀*, *PM_{2.5}* entre outros, que compõem a sua taxonomia.

As principais características que permitem classificar e estudar os sistemas de monitoramento presentes na literatura se referem a conectividade do sistema em relação a diferentes fontes de dados, a existência de tratamento semântico dos dados em contrapartida ao uso de bancos de dados com esquemas de acesso via SQL e a possibilidade de exteriorização das informações em formato aberto.

3. Arquitetura Proposta: Smart Architecture for Quality Environment Indicators (S.A.Q.E.I.)

Dentre as funcionalidades da arquitetura se encontram a homogeneização de dados coletados de fontes e formatos distintos, a criação de uma rede de dados conectados através de um vocabulário próprio e a construção e manipulação de índices e indicadores ambientais por parte do usuário final. Nas próximas seções são detalhadas as camadas da arquitetura e o fluxo de informação interno, desde a coleta de dados de sensores até a disponibilização em formato aberto dos indicadores criados por usuários. A Figura 1 apresenta as camadas da arquitetura e suas principais responsabilidades e papéis de forma simplificada na arquitetura.

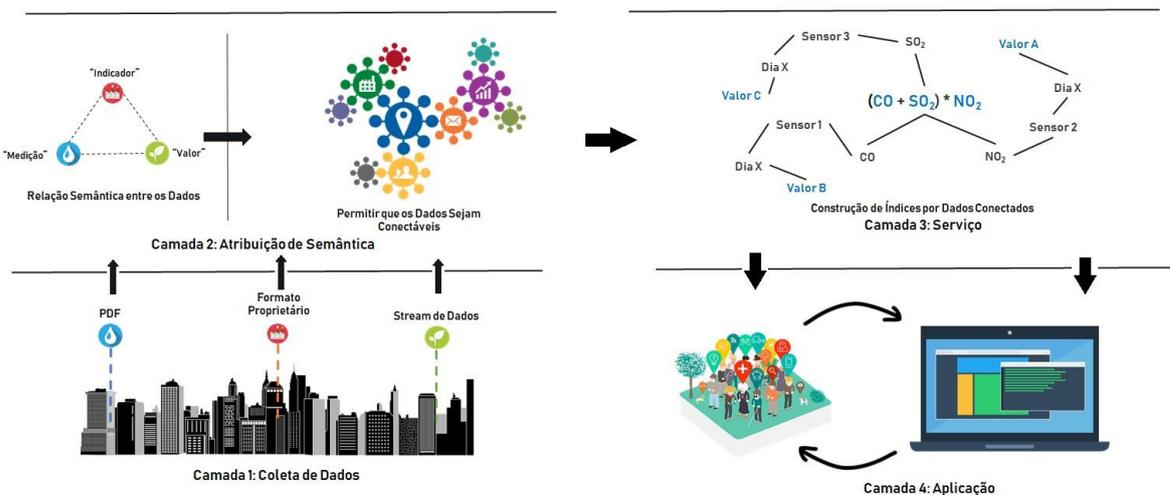


Figura 1: Camadas da S.A.Q.E.I.

3.1. Camadas da Arquitetura

Para cada camada é realizada uma avaliação das suas funções, vantagens para a arquitetura e os dados esperados em sua entrada e saída.

3.1.1. Primeira camada: Coleta de dados

A primeira camada possui a função de coletar os dados de sensores de fontes privadas ou públicas como institutos ambientais de monitoramento ou repositórios de dados abertos municipais ou estaduais. Esses dados podem ser recebidos diretamente dos sensores via *streaming* de dados, neste caso o monitoramento e a entrada de medições e informações

são contínuos e a arquitetura deve ser capaz de tratar uma grande quantidade de dados de forma rápida e dedicada.

Na proposta defendida por Seric et al. (2011) a primeira camada atua sobre os sensores que fazem a leitura de dados dos fenômenos que os interessam. Assim, seu agente coletor captura estes dados e os armazena em um banco de dados. No projeto Common Scents (CS) conduzido pelo laboratório do Massachusetts *Institute of Technology* (M.I.T) os dados sobre as condições ambientais são oriundos de sensores móveis instalados em bicicletas. Na sua camada de tratamento de dados, são utilizadas bases de dados dispostas em servidores para a geração de dados integrados e padronizados.

Outro cenário possível é o de que as próprias instituições detentoras da informação tratem os dados coletados pelos sensores e os forneçam em diversos formatos, como arquivos CSV, PDF, formatos proprietários ou até mesmo imagens. Ainda deve-se ressaltar que esta camada poderá receber dados estáticos ou dinâmicos, de fontes distintas e em formatos diferentes. Tratar tantas formas de dados é uma função laboriosa e por isso buscou-se na literatura formas de se trabalhar com eles que possam ser implementados na S.A.Q.E.I.

3.1.2. Segunda Camada: Atribuição de semântica

A camada seguinte se refere à preparação para a conectividade dos dados pela atribuição de valor semântico aos mesmos baseando-se na ontologia. A ontologia desenvolvida tem o objetivo de definir conceitos e relações relativos à construção e monitoramento de índices ambientais, por meio de classes, axiomas e relações. Porém, sempre que possível deve fazer o reuso de conceitos já definidos em ontologias de alto nível. Foi o caso desta ontologia de domínio ao reutilizar conceitos presentes nas ontologias *time.owl*, *ssn.owl* desenvolvidas pela *World Wide Web Consortium* (W3C) e na *environment.owl* desenvolvida no projeto GCI pela Universidade de Toronto-CA. Entretanto, outros conceitos tiveram que ser definidos visando o controle das medições coletadas e a disponibilização de indicadores e índices derivados destes em classes da ontologia.

A ontologia é quem realiza a homogeneização do significado dos dados, i.e., que viabiliza o compartilhamento de informações que antes estavam dispersas em diferentes formatos e linguagens. Com os dados semanticamente conectados é possível realizar inferências lógicas. Desta forma, é possível agregar valor às informações já presentes, como propõe Sheth (2014) ao descrever o conceito de *smart data*, conforme mais dados instanciarem os conceitos e relações da ontologia. Portanto, esta camada pode receber dados crus ou tratados, e tem como saída um arquivo RDF com base na ontologia desenvolvida.

3.1.3. Terceira Camada: Serviços

Com base na ideia de Kon et al. (2016), a terceira camada deve ser vista como uma “*Middleware* de Serviços” desenvolvida para implementar os serviços e geração de informação para publicação. Ela se encarrega da lógica de aplicação, criação das relações de índices personalizados de usuários e cálculo de indicadores com valores de tempo de coleta dinâmicos e índices compostos de indicadores diversos.

A arquitetura deve permitir a representação de medições e valores ao longo do tempo de diversos indicadores ambientais. Além disso, deve permitir que os usuários possam monitorar os índices e também construir e desenvolver seus próprios índices ambientais. A saída da camada são medições para a construção de novos índices ambientais.

3.1.4. Quarta Camada: Aplicação

A última camada é a de aplicação e representa o consumo dos dados gerados pela arquitetura pelos usuários finais. Ela deve conter um terminal para consulta SPARQL para usuários com conhecimento para manipulação direta de ontologias. Para os que não possuem tal conhecimento, deve haver uma interface para construção, monitoramento e compartilhamento de índices ambientais, sendo este um requisito importante desta camada.

Os meios para se chegar à essa interface ainda estão sendo estudados, mas acredita-se que seja fundamental representar os dados conectados e o domínio que a ontologia representa sem se apoiar em competências técnicas. Com isso qualquer pessoa poderá criar iniciativas baseadas nas informações disponibilizadas.

4. Estudo de Caso: Monitoramento da Qualidade do Ar com os Dados de Sensores do Instituto Ambiental Paranaense (IAP)

Como prova de conceito (POC) da arquitetura S.A.Q.E.I, utilizamos o contexto local do Estado do Paraná. O IAP, entidade vinculada à Secretaria Estadual de Meio-Ambiente, realiza a coleta de dados sobre os agentes poluentes em várias regiões do estado. Atualmente, o monitoramento de índices ambientais ocorre em vários estados do Brasil, mas sem a integração de dados em tempo real e sem a padronização dos dados gerados.

Não existem no momento projetos de monitoramento que permitam aos cidadãos explorarem informações sobre indicadores a fim de que possam gerar os seus próprios. Com base nisso, descrevemos a seguinte situação: um cidadão deseja obter dados sobre a qualidade do ar em diferentes regiões da cidade de Curitiba para saber quais são as áreas de maior risco para pessoas com problemas respiratórios. A seguir mostramos como a arquitetura pode estar presente neste caso mais concreto. Para a POC, foi utilizado um protótipo da plataforma implementada na linguagem Java e com Apache Jena Framework.

4.1. Coleta dos Dados

Na primeira camada, os dados necessários são obtidos por meio de sensores das estações de coletas de dados ambientais que podem operar em modo automático, semiautomático ou manualmente. Esses dados atualmente, são disponibilizados em formato PDF², diferentemente do formato aberto, proposto pela S.A.Q.E.I. Devido a este formato, foi necessário executar uma preparação dos dados com PostGreSQL para estrutura dos dados em formato CSV (*Comma-separated Values*).

Para a POC utilizamos o cálculo do índice de qualidade de ar calculado pela função $(CO + SO_2) * NO_2$. A função é composta por três indicadores ambientais distintos:

² <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1076.html>

o CO (monóxido de carbono), o SO₂(dióxido de enxofre) e o NO₂ (dióxido de nitrogênio). Cada um desses indicadores possui um valor específico de acordo com o método de medição selecionado pelo usuário. Os sensores podem disponibilizar o “pior” valor do dia selecionado, a média de todas as coletas do dia ou até mesmo o “melhor” valor coletado. As referências de “pior” e “melhor” modificam de acordo com o indicador. Outro dado também a ser considerado é o local do sensor, cuja medição pode ser especificamente de uma estação ou uma média de todas as estações da cidade. A Tabela 1 mostra os dados coletados para a POC, indicadores de 3 regiões de Curitiba: Boqueirão, Santa Cândida e Cidade Industrial.

Coletas de dados de Indicadores do dia 01/04/2016			
	Boqueirão	Santa Cândida	Cidade Industrial
CO	3 µg/m ³	1 µg/m ³	7 µg/m ³
SO ₂	1 µg/m ³	1 µg/m ³	24 µg/m ³
NO ₂	1 µg/m ³	16 µg/m ³	1 µg/m ³

Tabela 1: Dados coletados de 3 regiões de Curitiba

4.2. Atribuição Semântica

Os dados provenientes de sensores são interpretados e instanciados na ontologia desenvolvida para representar índices e indicadores ambientais. Foi desenvolvida uma ontologia para representar a semântica das medições com base em estudos sobre representação de índices e indicadores ambientais apresentados por Dahleh e Fox (2016) e Fox (2015). A ontologia representa um vocabulário comum para as medições de diferentes estações assim como possibilita a criação dos índices representando através das relações. A tabela 2 mostra a semântica associada às medições de monóxido de carbono (CO) das estações Boqueirão e Cidade Industrial (CIC). Essa atribuição semântica mostra a interoperabilidade que a ontologia permite no tratamento de dados oriundos de diferentes padrões de sensores em diferentes estações, que muitas vezes não são padronizados em um único formato.

As 6 triplas RDF da Tabela 2 são formadas pelos elementos: sujeito, predicado e objeto. Por exemplo, a medição mostrada na Tabela 2 do indicador CO na estação de coleta Boqueirão com o valor de 3 micrograma por metro cúbico recebe semântica pelo conjunto de triplas representadas nas linhas [1], [3] e [5] da Tabela 2.

Na tripla representada na linha [1] da Tabela 2 está representado semanticamente que a medição diz respeito ao indicador CO na estação Boqueirão. Na tripla na linha [3] na Tabela 2 está representando semanticamente que a medição do CO na estação Boqueirão aconteceu no dia 01/04/2016.

Medições são relacionadas à uma estação de coleta:	
[1]	< AQ_Measurement_CO, wasAttributedTo, IAP_Station_Boqueirão >
[2]	< AQ_Measurement_CO, wasAttributedTo, IAP_Station_CIC >
Medições são relacionadas a seu dia e horário de coleta:	
[3]	< AQ_Measurement_CO_Boqueirão, hasHappenedOn, "2016-04-01T01:00:00" >
[4]	< AQ_Measurement_CO_CIC, hasHappenedOn, "2016-04-01T01:00:00" >
Medições são relacionadas a seu valor de coleta:	
[5]	< AQ_Measurement_CO_Boqueirão, microgram_per_cubic_metre, 3 >
[6]	< AQ_Measurement_CO_CIC, microgram_per_cubic_metre, 7 >

Tabela 2: Exemplo de Atribuição de semântica

E finalmente, na tripla [5] da Tabela 2 a tripla está representado semanticamente o valor 3 para a medição em micrograma por metro cúbico de CO no Boqueirão no dia 01/04/2016. Analogamente acontece com as triplas das linhas [2], [4] e [6] para a estação da Cidade Industrial.

4.3. Serviços

A camada três faz o papel de provedora das informações geradas pelo processamento da camada anterior. Também, acrescenta o conteúdo que servirá de insumo para as aplicações consumidoras deste sistema viabilizarem a exteriorização dos dados. Nesta camada, a linguagem de *queries* SPARQL permite consultar os dados armazenados em formato de triplas RDF.

Indicador recebe a média das medições realizadas no dia:	
[1]	< AQ_Indicator_of_CO, microgram_per_cubic_metre, 5 >

Tabela 3: Cálculo da função do indicador

A tabela 3 mostra a tripla que representa o valor de um indicador na arquitetura. Neste exemplo, representamos semanticamente que o indicador carbono (CO) tem valor de 5 microgramas por metro cúbico. Esse valor se refere à média das medições realizadas no dia para o carbono em uma estação de coleta específica. A arquitetura proposta foi capaz de representar diferentes índices ambientais de acordo com as particularidades requeridas pelo usuário. Além de relacionar a interface de uso da aplicação e o *back-end* da arquitetura, onde são definidos o vocabulário, classes e relações entre os dados e onde ocorre a coleta, conexão e atribuição semântica dos dados.

Criação do Índice	
Atribuição a um usuário	
[1]	< AQ_Index_A, wasAttributedTo, User_A >
Índice é relacionadas a seus indicadores:	
[3]	< AQ_Index_a, hasIndicator, AQ_Indicator_of_CO >
[4]	< AQ_Index_a, hasIndicator, AQ_Indicator_of_SO2 >
[5]	< AQ_Index_a, hasIndicator, AQ_Indicator_of_NO2 >

Tabela 4: Representação semântica do índice ambiental

A tabela 4 se trata da representação semântica do índice construído pelo usuário. A linha [1] representa que o índice criado pertence a um usuário, aqui tratado como User_A. Além disso, a partir da linha [3] são representadas as relações dos índices com os indicadores presentes nele, assim, descrevemos que o índice definido anteriormente possui os seguintes indicadores: CO, SO2 e NO2. Cada um desses indicadores já foi calculado e possui um valor de coleta, como mostrado na Tabela 3.

4.3. Aplicação

Nessa aplicação foi possível manipular os dados conectados através da ontologia para permitir o usuário construir novos índices ambientais e visualizá-los sem a dependência de uma linguagem técnica para consulta destes dados.

	Função Índice: (CO + SO2) * NO2
Cidade Industrial:	31 µg/m3
Boqueirão:	4 µg/m3
Santa Cândida:	32 µg/m3

Tabela 5: Resultado da função construída

A tabela 5 mostra os resultados para a função criada pelo usuário para três regiões da cidade de Curitiba: Cidade Industrial, Boqueirão e Santa Cândida. Podemos ver que o primeiro bairro e o último tiveram resultados altos e, portanto, não são adequados para pessoas com problemas respiratórios, que era a necessidade de informação do usuário na POC.

5. Conclusão

Foi apresentada a proposta de uma arquitetura para tratar dados oriundos de sensores referentes a medições ambientais para a criação e monitoramento ambiental por meio de indicadores de qualidade. O diferencial desta arquitetura é a manipulação dos dados através de ontologias que trazem semântica para dados dos sensores e ampla disponibilização para cidadãos em formato aberto para reutilização. Para a validação da proposta, foi desenvolvido um protótipo em Java e Jena cuja utilização foi através de uma prova de conceito (POC) utilizando indicadores do IAP na cidade de Curitiba para o controle de qualidade do ar.

Com a prova de conceito foi possível observar como cada camada da arquitetura proposta executa sua função, bem como, também foi possível visualizar as dificuldades e questões que exigem estudos para de fato tornar viável o uso da arquitetura, tais como: o tratamento para streaming de dados para grande fluxo de informação; a flexibilização da entrada de dados por diferentes fontes; a solução a ser adotada no caso dos dados não estarem em formato aberto e estruturado como o RDF, a interface para possibilitar a manipulação de dados semânticas sem exigir conhecimento de RDF.

A principal característica dessa arquitetura é que as camadas são independentes e possuem entradas e saídas próprias. Além disso, ela é capaz de integrar dados de diferentes fontes e em diferentes formatos, tratando seus valores e significados pela ontologia construída. E por fim, permitindo aos cidadãos utilizar estes dados, disponibilizados de forma aberta pela arquitetura e adquiridos por sensores, para construir seus próprios índices ambientais e compartilhá-los ou utilizá-los para tomada de decisão ou aplicação em outras ações sociais, políticas e tecnológicas que queiram.

Outra discussão gerada se trata da disponibilização dos dados em formato aberto e permitir a inclusão da população nesta ferramenta sem a necessidade de conhecimentos técnicos e científicos sobre dados conectados, ontologias e computação geral. Estuda-se, como trabalhos futuros, uma forma de conseguir aproximar a consulta de dados em ontologias de uma forma mais natural para permitir que a população geral tenha acesso à essas informações também e não tão somente uma comunidade específica de pesquisadores. Essa aspiração torna-se ainda mais importante quando se conta com a participação da população e gestores em uma solução *linked data* para cidades inteligentes.

Referências

- Dahleh, D. & Fox, M. S. (2016). "An Environmental Ontology for Global City Indicators" (ISO 37120), 50.
- Fox, M. S. (2015). "The role of ontologies in publishing and analyzing city indicators" *Computers, Environment and Urban Systems*, Elsevier, 54, 266-279.
- Kon, F. et al. (2016) "Cidades Inteligentes: Conceitos, plataformas e desafios". Jornadas de Atualização em Informática 2016—JAI, p. 17.
- Lemos, A. (2013) "Cidades inteligentes". GV-executivo, v. 12, n. 2, p. 46-49.
- Métral, Claudine et al. (2007). "Ontologies for the Integration of Air Quality Models and 3D City Models". CoRR abs/1201.6511: n. pag.
- Montori, F., Bedogni, L. and Bononi, L. (2017) "A Collaborative Internet of Things Architecture for Smart Cities and Environmental Monitoring". In: IEEE Internet of Things Journal, vol. PP, no. 99, pp. 1-1.
- OGC (2006). Candidate OpenGIS CityGML Implementation Specification (City Geography Markup Language). Approved discussion paper of the Open Geospatial Consortium, Inc. related to CityGML specification, 06-057r1.
- Oprea M. M. (2009). "AIR_POLLUTION_Onto: an Ontology for Air Pollution Analysis and Control". AIAI 2009. IFIP International Federation for Information Processing, vol 296, pp. 135–143, Springer, Boston, MA.
- Oprea, M. (2005) "A case study of knowledge modelling in an air pollution control decision support system". AI Commun. 18, 4 (December 2005), pp. 293-303.
- Ribeiro, L. C. Q. (2015) "Estado da motorização individual no Brasil – Relatório 2015". Observatório das Metrôpoles. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional - IPPUR. 2015
- Shahanas, K. M. and Sivakumar, P. B. (2016) "Framework for a Smart Water Management System in the Context of Smart City Initiatives". In: India Procedia Computer Science, 92, pp. 142 - 147
- Sheth, Amit. (2014) "Smart data—How you and I will exploit Big Data for personalized digital health and many other activities." *Big Data (Big Data), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE.
- Spaargaren, G. (1997). The ecological modernization of production and consumption: Essays in environmental sociology. Spaargaren, 1997.
- Yuntao, Y., Lili, L., Hongli, Z. and Yunzhong J. (2016) "The System Architecture of Smart Water Grid for Water Security", *Procedia Engineering*, Volume 154, 2016, pp. 361–368.
- Ljiljana Šeric Darko Stipanicev, M. Š. (2011) Observer network and forest fire detection *Information Fusion*, 2011, Volume 12, Issue 3, 160-175