

SensingBus: um Sistema de Sensoriamento Baseado em Ônibus Urbanos

Pedro Cruz¹, Felipe F. da Silva¹, Roberto G. Pacheco², Rodrigo S. Couto², Pedro B. Velloso, Miguel Elias M. Campista¹ e Luís Henrique M. K. Costa¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/GTA

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro - PEL/DETEL/FEN

{cruz, felipe, velloso, miguel, luish}@gta.ufrj.br

{roberto.pacheco, rodrigo.couto}@uerj.br

Abstract. *To develop Smart City applications, urban Internet of Things infrastructures are fundamental to sensing and communication tasks. The trivial alternative is to deploy static Wireless Sensor Networks (WSNs), but this becomes prohibitive as the number of sensors grows. This paper proposes SensingBus, a general-purpose system to collect data with sensors embedded into urban buses. SensingBus benefits from nodes' mobility to enlarge the monitored area. SensingBus follows a three-layer architecture: one collects data; another receives and pre-processes data before sending it over Internet; and a third one stores, processes, and delivers data to end users. Results show SensingBus provides sampling and transmission rates suitable to typical Smart City applications.*

Resumo. *Para desenvolver aplicações de Cidades Inteligentes, infraestruturas urbanas de Internet das Coisas são fundamentais em tarefas de sensoriamento e comunicação. A alternativa trivial, com a instalação de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) estáticos, pode se tornar proibitiva com o aumento do número de nós. Este trabalho propõe o SensingBus, um sistema que provê mobilidade a sensores ao embarcá-los em ônibus urbanos, expandindo a área monitorada. A arquitetura adotada possui três camadas: uma coleta dados; outra pré-processa dados antes do envio pela Internet; e uma terceira armazena, processa e entrega dados a usuários finais. Resultados mostram que o SensingBus oferece taxas de amostragem e transmissão compatíveis com aplicações de Cidades Inteligentes.*

1. Introdução

Cidades Inteligentes utilizam dados obtidos através de diferentes métodos com a finalidade de aprimorar os serviços fornecidos aos cidadãos, além de possibilitar a oferta de novos serviços. Muitos desses dados podem ser coletados através do paradigma da Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), no qual objetos cotidianos são dotados de interfaces de comunicação, processamento e sensoriamento [Gubbi et al., 2013].

O sensoriamento em Cidades Inteligentes requer o espalhamento de sensores por uma grande região geográfica, o que pode apresentar um custo proibitivo. Uma opção de contorno é aplicar uma Rede de Sensores Sem-Fio Móveis cobrindo a região, utilizando a mobilidade desses sensores para reduzir a infraestrutura necessária. Adicionalmente, é possível empregar uma infraestrutura de Computação em Nuvem para processar e armazenar os dados coletados por diferentes dispositivos, a fim de compensar as limitações

dos dispositivos da IoT. As ações de entrada (p.ex., sensores) e saída (p.ex., atuadores) continuam sendo realizadas pelos dispositivos, enquanto as tarefas de processamento são realizadas na nuvem, dotada de maior capacidade de processamento. Uma preocupação com esta configuração se refere ao tráfego trocado na rede, que pode ser elevado. Outra preocupação é a segurança, já que os dispositivos de IoT possuem recursos limitados, e nem sempre são capazes de implementar protocolos seguros para comunicação com a nuvem. Essa limitação pode ser compensada através de uma infraestrutura, denominada névoa, capaz de pré-processar os dados antes que os mesmos trafeguem pela Internet [Coutinho et al., 2016]. Assim, é possível empregar protocolos de segurança mais sofisticados, além de as mensagens poderem ser agregadas ou filtradas na névoa, reduzindo o tráfego com a nuvem.

A solução de sensoriamento adotada pelos projetos Mosaic [Dong et al., 2015], OpenseNSE [Marjovi et al., 2015] e BusNet [Zoysa et al., 2007] é a de utilizar veículos do transporte público para coletar dados de qualidade do ar ou de condição de vias das cidades e oferecê-los a aplicações de usuários. Além de dotar os sensores de mobilidade sem custo adicional, o uso dos ônibus urbanos possui a vantagem dos mesmos seguirem trajetórias pré-determinadas, dando previsibilidade às regiões sensoreadas por cada nó. Os projetos OpenseNSE e Busnet não utilizam uma infraestrutura de nuvem para armazenar e processar os dados coletados. O projeto Mosaic utiliza uma infraestrutura de nuvem para armazenar e processar os dados coletados, mas não realiza nenhum pré-processamento antes dos dados serem enviados pelos nós de sensoriamento à nuvem.

Este trabalho apresenta o SensingBus, um sistema para coleta de dados ambientais no contexto de Cidades Inteligentes. Dentro do paradigma de IoT, os ônibus de transporte público são utilizados para prover mobilidade aos nós de uma rede de sensores sem-fio. Diferentemente dos projetos citados anteriormente, o SensingBus utiliza uma arquitetura de três camadas proposta por [Li et al., 2016]. Nessa arquitetura, os dispositivos IoT realizam a coleta de dados em uma ponta e uma infraestrutura de nuvem executa o processamento e armazenamento dos dados coletados na outra ponta. Adicionalmente, é utilizada uma infraestrutura de névoa entre os dispositivos IoT e a nuvem, para reduzir problemas de desempenho e segurança causados pelo tráfego dos dados pela Internet. A camada de névoa permite que o sistema SensingBus possa autorizar e filtrar os dados que chegam aos usuários sem que sejam necessários dispositivos de sensoriamento com poder computacional elevado. A análise do desempenho do SensingBus mostra que é possível alcançar uma taxa de amostragem de aproximadamente 1 medição por segundo, o que, segundo [Zanella et al., 2014], é o suficiente para aplicações de controle de congestionamento, monitoramento da qualidade do ar, ou ainda iluminação inteligente.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve as funcionalidades do sistema SensingBus. A Seção 3 apresenta sua arquitetura, detalhando as funções e a implementação de cada camada. A Seção 4 apresenta uma análise do desempenho do SensingBus, enquanto a Seção 5 descreve como será realizada a demonstração. Por fim, a Seção 6 conclui o artigo e aponta trabalhos futuros.

2. Funcionalidades do SensingBus

O SensingBus é um sistema completo que implementa desde as principais funcionalidades de coleta de dados ambientais em uma cidade, até o armazenamento e a

entrega dos dados para os usuários. O sistema tem por objetivo permitir que serviços de manutenção e controle da cidade sejam aperfeiçoados, através do mapeamento de suas condições em tempo real. De maneira resumida, as principais funcionalidades do SensingBus são:

- **Coleta de dados ambientais:** o SensingBus realiza a coleta de dados ambientais ao longo dos trajetos dos ônibus que possuem nós de sensoriamento embarcados.
- **Pré-processamento dos dados:** o SensingBus executa um pré-processamento dos dados antes de transmiti-los pela Internet, eliminando dados inconsistentes e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de dados que trafegam pela Internet. Adicionalmente, através de chaves e certificados, o sistema impede que dispositivos não autorizados publiquem dados ou alterem dados legítimos antes que esses cheguem aos usuários.
- **Busca de dados sensorados:** usuários podem buscar dados que estejam na base de dados, através de uma API, e recebê-los no formato JSON. Os dados podem ser filtrados por janela de tempo, coordenadas geográficas, identificador do nó de Coleta ou pelo ônibus que realizou a coleta.
- **Armazenamento de dados sensorados:** dispositivos autorizados podem inserir dados no servidor da estrutura de Computação em Nuvem, através de uma API. Assim, é possível a integração do sistema com outras fontes de dados.
- **Visualização de dados sensorados:** usuários podem buscar dados que estejam na base de dados e visualizá-los em um mapa. Os dados a serem visualizados no mapa também podem ser filtrados por tipo de dado, janela de tempo, coordenadas geográficas ou pelo ônibus que realizou a coleta. A visualização é feita através de um navegador, sem a necessidade de instalações de software por parte do usuário.

A implementação do sistema utiliza protocolos abertos e é baseada em uma arquitetura em camadas, apresentada na Seção 3. Estas características privilegiam a modularidade e extensibilidade do sistema.

3. Arquitetura do SensingBus

A arquitetura do SensingBus, ilustrada na Figura 1, é dividida em três camadas: Coleta, Recepção e Publicação. Os dados são obtidos pela camada de Coleta, que é composta por nós de sensoriamento situados nos veículos. Estes dados são então repassados para a camada de Recepção, que consiste em nós fixos instalados pela cidade, como em pontos de ônibus. Essa camada realiza pré-processamento dos dados, atuando como o que se convencionou chamar de névoa computacional, além de garantir a autenticidade dos dados. A camada de Publicação, situada na nuvem, recebe e processa os dados dos nós da Recepção, realizando a maior parte do processamento na arquitetura do SensingBus. Por fim, essa camada disponibiliza os dados aos usuários. Cada uma das camadas do SensingBus é detalhada a seguir.

3.1. Coleta

A camada de Coleta é responsável por colher dados sobre a cidade e entregá-los à camada de recepção. Antes da entrega, os dados são associados ao local e momento em que foram coletados. Essa camada é composta de nós de Coleta acoplados aos ônibus que circulam pela cidade. A arquitetura de cada nó de coleta, ilustrada na Figura 1, segue a arquitetura básica de dispositivos IoT [Santos et al., 2016].

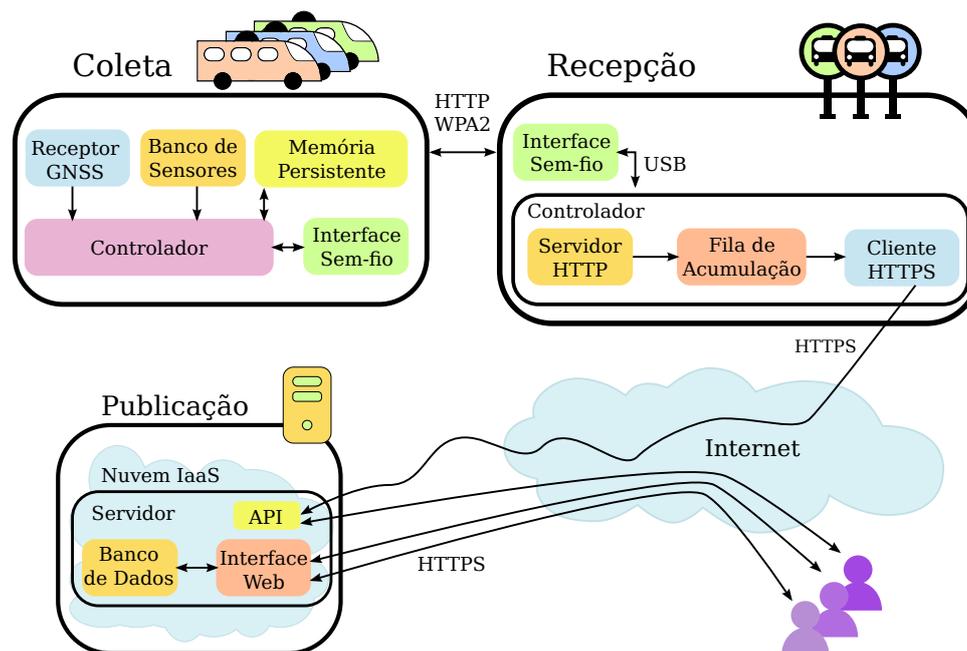


Figura 1. Arquitetura do sistema SensingBus: nós de Coleta, Recepção e Publicação.

Dentro da Coleta, um Controlador gerencia todas as tarefas de cada nó de coleta. A uma determinada taxa de amostragem, o Controlador adquire as medidas coletadas pelos sensores do Banco de Sensores e as associa à posição e ao horário indicados pelo Receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Após a associação dos dados coletados à sua posição e momento de coleta, o Controlador armazena os dados na Memória Persistente. Em cada iteração, o Controlador consulta a Interface Sem-Fio sobre a existência de uma conexão com a camada Recepção. A associação entre um nó de Coleta e um nó de Recepção se dá através de WPA2, com uma chave compartilhada entre os dois nós. Se houver conexão, o Controlador envia os dados armazenados na Memória Persistente para a Interface Sem-Fio, que transmite os dados para a Recepção utilizando um POST HTTP.

O Controlador envia para a Interface Sem-Fio apenas os dados gerados pelo Banco de Sensores e pelo Receptor GNSS. A Interface Sem-Fio, por sua vez, se encarrega de encapsular os dados com os cabeçalhos do POST. Essa separação de tarefas é realizada para melhorar o desempenho da comunicação, visto que o Controlador possui baixo poder de processamento. Os resultados apresentados na Seção 4 mostram que essa abordagem aumenta em mais de três vezes a vazão da comunicação entre a Coleta e a Recepção, em comparação com o cenário no qual o Controlador realizaria o encapsulamento HTTP.

Os equipamentos utilizados para implementar o nó de Coleta estão relacionados na Tabela 1. O Arduino UNO R3 foi escolhido como Controlador por ser um equipamento de baixo custo com poder computacional suficiente para executar as tarefas do Controlador. O nó de Coleta é instalado na parte interna do ônibus, exceto pelo Banco de Sensores e a Interface Sem Fio, que são instalados na parte externa do ônibus dentro de uma caixa protetora.

Tabela 1. Equipamentos componentes do nó de Coleta.

Módulo	Equipamento	Fabricante
Controlador	Arduino UNO R3	Arduino
Receptor GNSS	GS-96U7	Guangzhou Xintu
Memória Persistente	GS-96U7	Guangzhou Xintu
Interface sem Fio	ESP8266	Espressif
Banco de Sensores	Sensor de Umidade DHT11	DFRobot
	Sensor de Temperatura DHT11	DFRobot
	Sensor de Intensidade Luminosa GL5528	GBK Robotics
	Sensor de Intensidade de Chuva GL5528	GBK Robotics

3.2. Recepção

Os nós da camada Recepção são responsáveis por receber os dados brutos da Coleta, analisá-los e filtrar possíveis inconsistências. Essas inconsistências podem ocorrer devido a erros de associação entre os dados ambientais e os dados de localização obtidos pela Coleta, ou até mesmo por erros dos sensores durante a coleta de dados. As inconsistências são detectadas quando os dados estão fora de uma faixa considerada viável.

A Recepção utiliza o conceito de computação em névoa (ou *fog computing*) [Coutinho et al., 2016]. Nessa arquitetura, parte dos recursos computacionais são deslocados para a borda da rede, a fim de realizar o pré-processamento dos dados da Coleta. Um exemplo de pré-processamento oferecido pela Recepção trata-se da função da Fila de Acumulação de dados. A Fila de Acumulação atua como um *buffer*, armazenando os dados recebidos pela Recepção durante um determinado período de tempo. Após isso, agrega todos esses dados em uma mensagem e os envia à Publicação. Dessa maneira, a Fila de Acumulação reduz a sobrecarga de cabeçalhos, diminuindo o tráfego entre essas camadas. No SensingBus, o conceito de névoa também é usado para possibilitar que apenas nós da Coleta autorizados consigam enviar dados para a Publicação. Para tal, cada nó da Recepção implementa um ponto de acesso IEEE 802.11, que oferece uma rede privada baseada no padrão WPA2 (*Wi-Fi Protected Access 2*). Assim, os nós da Coleta se conectam a essa rede utilizando senhas pré-configuradas. As mensagens entre a Coleta e a Recepção são enviadas por HTTP.

Em relação à Publicação, cada nó da Recepção comporta-se como um cliente HTTPS, enviando dados para o servidor situado na Publicação, como ilustrado na Figura 1. O uso do HTTPS possibilita a existência de comunicação segura entre a Recepção e a Publicação. Além da verificação do certificado do servidor da Publicação, intrínseca ao protocolo HTTPS, a Recepção também apresenta um certificado a esse servidor. Esse certificado é assinado por uma Autoridade Certificadora reconhecida pela Publicação. Essa medida visa assegurar que os nós da Publicação só aceitem dados provenientes de nós autorizados.

Os equipamentos utilizados para implementar a camada Recepção neste trabalho estão relacionados na Tabela 2. A escolha do Raspberry Pi como o equipamento da Recepção deve-se, sobretudo, ao seu baixo custo e sua configuração de *hardware* satisfatória para implementar as funcionalidades desejadas. Assim, para um orçamento

limitado, mais pontos de ônibus podem ser utilizados na arquitetura.

Tabela 2. Equipamentos componentes do nó de Recepção.

Módulo	Equipamento	Fabricante
Controlador	Raspberry Pi II model B	Raspberry Pi Foundation
Interface Sem-Fio	TL-WN722N	TP-LINK

3.3. Publicação

No SensingBus, a Publicação é o destino dos dados obtidos por todos os nós da Coleta, após o pré-processamento pela Recepção. Os dados são armazenados e ficam disponíveis para os usuários. O nó de Publicação consiste em uma máquina virtual hospedada em uma nuvem geodistribuída, fornecida pelo projeto PID [Couto et al., 2015]. A nuvem utilizada é do tipo IaaS (*Infrastructure as a Service* - Infraestrutura como Serviço), implementada através do orquestrador Openstack¹. Na Publicação, um servidor Apache² recebe requisições HTTPS, que são tratadas pela aplicação Django³. Os dados são armazenados e consultados no banco de dados relacional MySQL⁴.

A Publicação oferece uma URL para inserção de dados, que é protegida pelo servidor Apache. Apenas clientes que apresentem um certificado reconhecido pelo servidor são autorizados a escrever na base de dados. Isso implica que, além dos dados e metadados gerados pela Coleta, os POSTs de um nó de Recepção devem conter um certificado gerado pela Autoridade Certificadora na qual o servidor possui confiança, mencionado na Seção 3.2. Dessa forma, os privilégios de escrita são fornecidos apenas aos dispositivos que possuem certificados assinados pela Autoridade Certificadora. Esse procedimento visa impedir que o nó da Publicação receba dados falsos, gerados por dispositivos maliciosos se passando por nós de Recepção. Assim, a segurança do SensingBus é garantida pelo WPA2, entre a Recepção e a Coleta, e por chaves assimétricas e certificados, entre a Recepção e a Publicação.

Usuários que busquem dados na Publicação não precisam ser autorizados, pois é considerado que os dados coletados pelo SensingBus são públicos. Durante a consulta de dados à Publicação, tanto por API quanto pela interface *web*, é possível que os usuários apliquem filtros de busca, como mencionado na Seção 2. Pela interface *web*, os dados visualizados são distribuídos em um mapa geográfico da cidade, enquanto que através da API os dados são retornados no formato JSON.

4. Análise do SensingBus

Com a finalidade de verificar as aplicações de sensoriamento que o SensingBus é capaz de atender, nesta seção são descritas medidas de desempenho obtidas com o sistema. Os testes foram realizados em laboratório, a fim de um melhor controle das condições. A Tabela 3 apresenta as medidas realizadas (os valores são acompanhados de intervalo de confiança de 95%).

¹<https://www.openstack.org/> (acessado em 5 de abril de 2017)

²<http://httpd.apache.org/> (acessado em 5 de abril de 2017)

³<https://www.djangoproject.com/> (acessado em 5 de abril de 2017)

⁴<https://www.mysql.com/> (acessado em 5 de abril de 2017)

Tabela 3. Análise do SensingBus.

Grandeza	Valor medido
Taxa de amostragem de sensoriamento	$1,02 \pm 0,01$ Hz
Taxa de transmissão entre nós das camadas de Coleta e de Recepção	$1.302,5 \pm 0,9$ B/s
Taxa de geração de dados	$53,0 \pm 0,5$ B/s

A taxa de amostragem de sensoriamento é a taxa com que o Banco de Sensores é lido pelo controlador. A taxa de transmissão entre os nós das camadas de Coleta e de Recepção corresponde à quantidade de dados que podem ser enviados por um nó de Coleta para um nó de Recepção, quando há conexão entre os dois. A taxa de geração de dados corresponde à quantidade de dados gerados por segundo por um único nó de Coleta, com o Banco de Sensores e taxa de amostragem de sensoriamento mostrados neste trabalho. As medições obtidas mostram que o sistema é compatível com as taxas de amostragem e geração de tráfego previstas para as aplicações apontadas por [Zanella et al., 2014], como monitoramento de qualidade do ar, que demanda taxas de amostragem da ordem de 5 minutos. Segundo [Da Silva et al., 2013], os tempos médios de contato entre um ônibus e um ponto de acesso localizado em um ponto de ônibus são de 65s e 36s quando o ônibus para no ponto e quando não para no ponto, respectivamente. Então, pode-se afirmar que, em média, os nós de Coleta podem ficar aproximadamente 13 minutos sem contato com nenhum nó de Recepção e ainda assim entregar todos os dados coletados durante o intervalo.

5. Demonstração para o Salão de Ferramentas

Para a demonstração prevista, a arquitetura completa da Figura 1 será reproduzida, com nós da Coleta e da Recepção disponíveis para o público, emulando o cenário com ônibus e pontos de ônibus. Além disso, os usuários poderão acessar a página do projeto⁵ e interagir, em tempo real, com a interface gráfica de coleta de medidas. Os equipamentos relacionados nas Tabelas 1 e 2 serão fornecidos pelos autores e apresentados na demonstração. O nó referente à camada de Recepção estará hospedado na nuvem do projeto PID [Couto et al., 2015]. Será necessária conexão com a Internet via cabo para os nós de Recepção e um ou mais computadores com acesso à Internet para que os usuários possam acessar as páginas do SensingBus.

Os usuários poderão encontrar na página do projeto⁵ informações referentes ao SensingBus. As informações disponíveis incluem um manual do usuário explicando a utilização do SensingBus e também um guia de instalação, com intuito de que qualquer usuário seja capaz de reproduzir o sistema. Além disso, as documentações dos códigos poderão ser acessadas através da página⁵. Por último, há um repositório⁶, no qual encontram-se todos os códigos do SensingBus e instruções para replicação do sistema.

6. Conclusão

Este artigo apresentou o sistema de sensoriamento móvel SensingBus. O SensingBus utiliza conceitos de Internet das Coisas, computação em névoa e computação em

⁵<https://sensingbus.gta.ufrj.br> (acessado em 5 de abril de 2017)

⁶https://github.com/pedrocruz/sensing_bus (acessado em 5 de abril de 2017)

nuvem, com o objetivo de coletar dados ambientais de uma cidade. Os ônibus do transporte público são usados como plataforma de mobilidade para nós de sensoriamento e os dados são disponibilizados para os usuários por uma API ou uma interface web. Com o objetivo de atestar o desempenho do SensingBus, foram realizados testes que comprovaram a viabilidade e aplicabilidade do sensoriamento realizado.

Como trabalhos futuros, pretende-se implementar o sistema na frota de ônibus da cidade universitária da Ilha do Fundão e identificar aplicações que utilizem os dados disponibilizados pelo SensingBus.

Referências

- [Coutinho et al., 2016] Coutinho, A. A. T. R., Carneiro, E. O. e Greve, F. G. P. (2016). Computação em névoa: Conceitos, aplicações e desafios. Em *Minicursos do XXXIV SBRC*, p. 266–315.
- [Couto et al., 2015] Couto, R. S., Sciammarella, T., Barreto, H. F. S. S. M., Campista, M. E. M., Rubinstein, M. G., Costa, L. H. M. K., Vetter, F. e Marins, A. L. A. (2015). GT-PID: Uma nuvem IaaS universitária geograficamente distribuída. Em *Quinta Conferencia de Directores de Tecnología de Información - TICAL 2015*, p. 1–19. Redclara.
- [Da Silva et al., 2013] Da Silva, V. B., Da Silva, F. O., Campista, M. E. M. e Costa, L. H. M. (2013). A trajectory-based approach to improve delivery in drive-thru internet scenarios. Em *Communications Workshops (ICC), 2013 IEEE International Conference on*, p. 489–494. IEEE.
- [Dong et al., 2015] Dong, W., Guan, G., Chen, Y., Guo, K. e Gao, Y. (2015). Mosaic: Towards city scale sensing with mobile sensor networks. Em *Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2015 IEEE 21st International Conference on*, p. 29–36. IEEE.
- [Gubbi et al., 2013] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. e Palaniswami, M. (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7):1645–1660.
- [Li et al., 2016] Li, W., Santos, I., Delicato, F. C., Pires, P. F., Pirmez, L., Wei, W., Song, H., Zomaya, A. e Khan, S. (2016). System modelling and performance evaluation of a three-tier cloud of things. *Future Generation Computer Systems*.
- [Marjovi et al., 2015] Marjovi, A., Arfire, A. e Martinoli, A. (2015). High resolution air pollution maps in urban environments using mobile sensor networks. Em *2015 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, p. 11 – 20. IEEE.
- [Santos et al., 2016] Santos, B. P., Silva, L. A., Celes, C. S., Borges, J. B., Neto, B. S. P., Vieira, M. A. M., Vieira, L. F. M., Goussevskaia, O. N. e Loureiro, A. A. (2016). Internet das coisas: da teoria à prática. p. 1–50.
- [Zanella et al., 2014] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. e Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1):22–32.
- [Zoysa et al., 2007] Zoysa, K. D., Keppitiyagama, C., Seneviratne, G. P. e Shihan, W. W. A. T. (2007). A public transport system based sensor network for road surface condition monitoring. Em *NSDR '07 Proceedings of the 2007 workshop on Networked systems for developing regions*. NSDR.