

## Capítulo

# 1

## Internet das Coisas: da Teoria à Prática

Bruno P. Santos, Lucas A. M. Silva, Clayson S. F. S. Celes, João B. Borges Neto, Bruna S. Peres, Marcos Augusto M. Vieira, Luiz Filipe M. Vieira, Olga N. Goussevskaia e Antonio A. F. Loureiro

Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Belo Horizonte, MG, Brasil

{bruno.ps, lams, claysonceles, joaoborges, bperes, mmvieira, lfvieira,  
olga, loureiro}@dcc.ufmg.br

### *Abstract*

*The proliferation of smart objects with capability of sensing, processing and communication has grown in recent years. In this scenario, the Internet of Things (IoT) connects these objects to the Internet and provides communication with users and devices. IoT enables a huge amount of new applications, with which academics and industries can benefit, such as smart cities, health care and automation. On the other hand, there are several social, theoretical and practical issues we need to address. To answer these issues, we need to overcome some challenges like dealing with objects' constraints (e.g., processing, memory and energy supply), limited bandwidth and hardware dimension. Thus, we need to explore new communication paradigms, protocols including questions about IP addressing and adaptations to interoperate with the Internet, hardware architecture and software design. Besides that, IoT applications need to deal with the process of collecting, storing, processing and extracting knowledge from data obtained from the smart objects. The goal of this chapter is to describe the state-of-the-art of IoT by discussing theoretical and practical questions.*

## **Resumo**

*A proliferação de objetos inteligentes com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação tem aumentado nos últimos anos. Neste cenário, a Internet das Coisas (Internet of Things (IoT)) conecta estes objetos à Internet e promove a comunicação entre usuários e dispositivos. A IoT possibilita uma grande quantidade de novas aplicações, as quais tanto a academia quanto a indústria podem se beneficiar, tais como cidades inteligentes, saúde e automação de ambientes. Por outro lado, existem diversos desafios que devemos enfrentar no âmbito social, teórico e prático. Para responder a essas questões, precisamos vencer alguns desafios como, por exemplo, restrições dos objetos inteligentes (processamento, memória e fonte de alimentação), largura de banda limitada e dimensão do hardware. Deste modo, devemos explorar novos paradigmas de comunicação, protocolos incluindo questões sobre o endereçamento IP e adaptações para interoperar com a Internet, arquitetura de hardware e projeto de software. Além disso, aplicações de IoT precisam tratar questões como coletar, armazenar, processar e extrair conhecimento de dados obtidos dos objetos inteligentes. O objetivo deste capítulo é descrever o estado-da-arte de IoT discutindo questões teóricas e práticas.*

### **1.1. Introdução**

A Internet das Coisas (do inglês *Internet of Things (IoT)*) emergiu dos avanços de várias áreas como sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. De fato, a IoT tem recebido bastante atenção tanto da academia quanto da indústria, devido ao seu potencial de uso nas mais diversas áreas das atividades humanas. Este capítulo aborda a Internet das Coisas através de uma perspectiva teórica e prática. O conteúdo aqui abordado explora a estrutura, organização, desafios e aplicações da IoT. Nesta seção, serão conceituadas a IoT e os objetos inteligentes. Além disso, são apresentadas a perspectiva histórica da Internet das Coisas e as motivações que levam aos interesses, expectativas e pesquisas na área. Logo em seguida, são introduzidos os blocos básicos de construção da IoT. Para iniciar a discussão, será levantada a seguinte questão: o que é a Internet das Coisas?

A Internet das Coisas, em poucas palavras, nada mais é que uma extensão da Internet atual, que proporciona aos objetos do dia-a-dia (quaisquer que sejam), mas com capacidade computacional e de comunicação, se conectarem à Internet. A conexão com a rede mundial de computadores viabilizará, primeiro, controlar remotamente os objetos e, segundo, permitir que os próprios objetos sejam acessados como provedores de serviços. Estas novas habilidades, dos objetos comuns, geram um grande número de oportunidades tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial. Todavia, estas possibilidades apresentam riscos e acarretam amplos desafios técnicos e sociais.

A IoT tem alterado aos poucos o conceito de redes de computadores, neste sentido, é possível notar a evolução do conceito ao longo do tempo como mostrado a seguir. Para Tanenbaum [Tanenbaum 2002], “Rede de Computadores é um conjunto de computadores autônomos interconectados por uma única tecnologia”. Entende-se que tal tecnologia de conexão pode ser de diferentes tipos (fios de cobre, fibra ótica, ondas eletromagnéticas ou outras). Em 2011, Peterson definiu em [Peterson and Davie 2011] que a principal característica das Redes de Computadores é a sua generalidade, isto é, elas são construídas

sobre dispositivos de propósito geral e não são otimizadas para fins específicos tais como as redes de telefonia e TV. Já em [Kurose and Ross 2012], os autores argumentam que o termo “Redes de Computadores” começa a soar um tanto envelhecido devido à grande quantidade de equipamentos e tecnologias não tradicionais que são usadas na Internet.

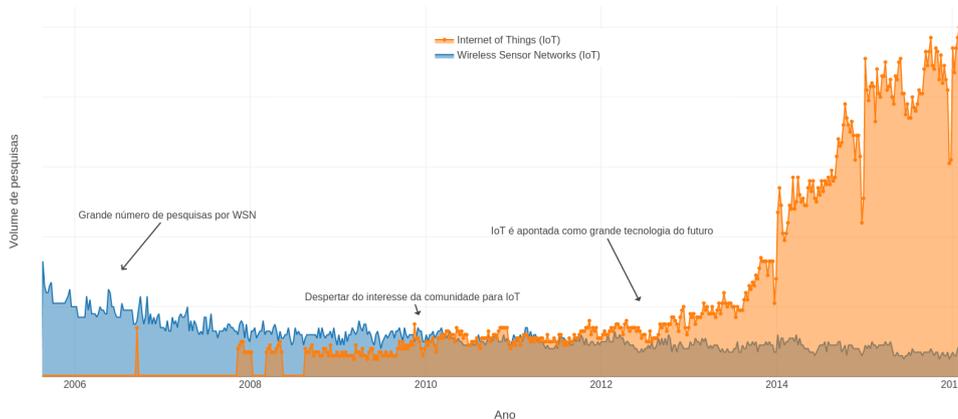
Os objetos inteligentes, definidos mais adiante, possuem papel fundamental na evolução acima mencionada. Isto porque os objetos possuem capacidade de comunicação e processamento aliados a sensores, os quais transformam a utilidade destes objetos. Atualmente, não só computadores convencionais estão conectados à grande rede, como também uma grande heterogeneidade de equipamentos tais como TVs, *Laptops*, automóveis, *smartphones*, consoles de jogos, *webcams* e a lista aumenta a cada dia. Neste novo cenário, a pluralidade é crescente e previsões indicam que mais de 40 bilhões de dispositivos estarão conectados até 2020 [Forbes 2014]. Usando os recursos desses objetos será possível detectar seu contexto, controlá-lo, viabilizar troca de informações uns com os outros, acessar serviços da Internet e interagir com pessoas. Concomitantemente, uma gama de novas possibilidades de aplicações surgem (ex: cidades inteligentes (*Smart Cities*), saúde (*Healthcare*), casas inteligentes (*Smart Home*)) e desafios emergem (regulamentações, segurança, padronizações). É importante notar que um dos elementos cruciais para o sucesso da IoT encontra-se na padronização das tecnologias. Isto permitirá que a heterogeneidade de dispositivos conectados à Internet cresça, tornando a IoT uma realidade. Também é essencial frisar que nos últimos meses e nos próximos anos serão vivenciados os principais momentos da IoT, no que tange as definições dos blocos básicos de construção da IoT.

Parafrazeado os autores [Mattern and Floerkemeier 2010], ao utilizar a palavra “Internet” no termo “*Internet of Things*” como acima mencionado, pode-se fazer uma analogia com a Web nos dias de hoje, em que brevemente as “coisas” terão habilidades de comunicação umas com as outras, proverão e usarão serviços, proverão dados e poderão reagir a eventos. Outra analogia, agora mais técnica, é que IoT vista como uma pilha de protocolos utilizados nos objetos inteligentes.

Na IoT, eventualmente, a unidade básica de *hardware* apresentará ao menos uma das seguintes características [Ruiz et al. 2004, Loureiro et al. 2003]: i) unidade(s) de processamento; ii) unidade(s) de memória; iii) unidade(s) de comunicação e; iv) unidade(s) de sensor(es) ou atuador(es). Aos dispositivos com essas qualidades é dado o nome de *objetos inteligentes* (*Smart Objects*). Os objetos, ao estabelecerem comunicação com outros dispositivos, manifestam o conceito de estarem em rede, como discutido anteriormente.

### **1.1.1. Perspectiva histórica da IoT**

Kevin Ashton comentou, em junho de 2009 [Ashton 2009], que o termo *Internet of Things* foi primeiro utilizando em seu trabalho intitulado “*I made at Procter & Gamble*” em 1999. Na época, a IoT era associada ao uso da tecnologia RFID. Contudo, o termo ainda não era foco de grande número de pesquisas como pode ser visto na Figura 1.1. Por volta de 2005, o termo bastante procurado (tanto pela academia quando indústria) e que apresenta relação com a IoT foi Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) (do inglês *Wireless Sensor Networks* – WSN). Estas redes trazem avanços na automação residencial e industrial [Kelly et al. 2013, Da Xu et al. 2014], bem como técnicas para explorar as



**Figura 1.1. Volume de pesquisas no Google sobre *Wireless Sensor Networks* e *Internet of Things***

diferentes limitações dos dispositivos (e.g., memória e energia), escalabilidade e robustez da rede [Loureiro et al. 2003]. Nos anos seguintes (entre 2008 e 2010), o termo Internet das Coisas ganhou popularidade rapidamente. Isto se deve ao amadurecimento das RSSFs e ao crescimento das expectativas sobre a IoT. A Figura 1.1 mostra que em 2010, as buscas para IoT dispararam chegando a ultrapassar as pesquisas sobre RSSFs.



**Figura 1.2. Tecnologias emergentes**

Em 2012, foi previsto que a IoT levaria entre cinco e dez anos para ser adotada pelo mercado e, hoje, é vivenciado o maior pico de expectativas sobre a tecnologia no âmbito acadêmico e industrial. Também pode-se notar o surgimento das primeiras plataformas de IoT (discutidas mais adiante) que têm gerado uma grande expectativa de seu uso. Estes fatos certamente servem de incentivo para despertar a curiosidade do leitor para a área, bem como indica o motivo do interesse da comunidade científica e industrial para a IoT.

A IoT foi identificada como uma tecnologia emergente em 2012 por especialistas da área [Gartner 2015]. A Figura 1.2 apresenta uma maneira de representar o surgimento, adoção, maturidade e impacto de diversas tecnologias chamada de *Hype Cycle*, ou “Ciclo de Interesse”. O pesquisador Clarke, pesquisador do MIT, propôs a curva dos dois elefantes, que

Em 2012, foi previsto que a IoT levaria entre cinco e dez anos para ser adotada pelo mercado e, hoje, é vivenciado o maior pico de expectativas sobre a tecnologia no âmbito acadêmico e industrial.

### 1.1.2. Motivação para manutenção da evolução da IoT

Ao conectar objetos com diferentes recursos a uma rede, potencializa-se o surgimento de novas aplicações. Neste sentido, conectar esses objetos à Internet significa criar a Internet das Coisas. Na IoT, os objetos podem prover comunicação entre usuários, dispositivos. Com isto emerge uma nova gama de aplicações, tais como coleta de dados de pacientes e monitoramento de idosos, sensoriamento de ambientes de difícil acesso e inóspitos, entre outras [Sundmaeker et al. 2010].

Neste cenário, a possibilidade de novas aplicações é crescente, mas temos novos desafios de conectar à Internet objetos com restrições de processamento, memória, comunicação e energia [Loureiro et al. 2003]. Naturalmente, nesse caso os objetos são heterogêneos, isto é, divergem em implementação, recursos e qualidade. Algumas das questões teóricas quanto práticas que surgem são, por exemplo, prover endereçamento aos dispositivos, encontrar rotas de boa vazão e que usem parcimoniosamente os recursos limitados dos objetos. Deste modo, fica evidente a necessidade da adaptação dos protocolos existentes. Além disso, sabe-se que os paradigmas de comunicação e roteamento nas redes de objetos inteligentes podem não seguir os mesmos padrões de uma rede como a Internet [Chaouchi 2013].

Novos desafios surgem enquanto são criadas novas aplicações para IoT. Os dados providos pelos objetos agora podem apresentar imperfeições (calibragem do sensor), inconsistências (fora de ordem, *outliers*) e serem de diferentes tipos (gerados por pessoas, sensores físicos, fusão de dados). Assim, as aplicações e algoritmos devem ser capazes de lidar com esses desafios sobre os dados. Outro exemplo diz respeito ao nível de confiança sobre os dados obtidos dos dispositivos da IoT e como/onde pode-se empregar esses dados em determinados cenários. Deste modo, os desafios impostos por essas novas aplicações devem ser explorados e soluções devem ser propostas para que a IoT contemplem as expectativas em um futuro próximo como previsto na Figura 1.2.

Alguns autores apontam que a IoT será a nova revolução da tecnologia da informação [Ashton 2009, Forbes 2014, Wang et al. 2015]. Sendo assim, a IoT possivelmente não deve ser entendida como um fim, mas sim um meio de alcançar algo maior como a computação ubíqua.

### 1.1.3. Blocos Básicos de Construção da IoT

A IoT pode ser vista como a combinação de diversas tecnologias, as quais são complementares no sentido de viabilizar a integração dos objetos no ambiente físico ao mundo virtual. A Figura 1.3 apresenta os blocos básicos de construção da IoT sendo eles:

**Identificação:** é um dos blocos mais importantes, visto que é primordial identificar os objetos unicamente para conectá-los à Internet. Tecnologias como RFID, NFC (*Near Field Communication*) e endereçamento IP podem ser empregados para identificar os objetos.

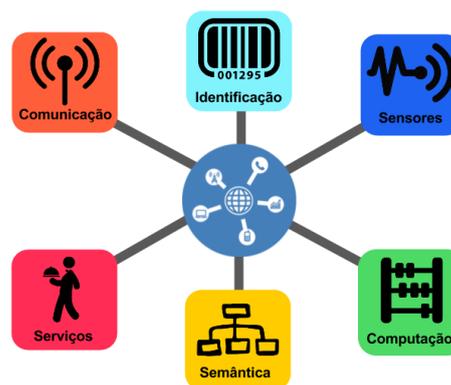
**Sensores/Atuadores:** sensores coletam informações sobre o contexto onde os objetos se encontram e, em seguida, armazenam/encaminham esses dados para *data warehouse*, *clouds* ou centros de armazenamento. Atuadores podem manipular o ambiente ou reagir de acordo com os dados lidos.

**Comunicação:** diz respeito às diversas técnicas usadas para conectar objetos intelligen-

tes. Também desempenha papel importante no consumo de energia dos objetos sendo, portanto, um fator crítico. Algumas das tecnologias usadas são WiFi, Bluetooth, IEEE 802.15.4 e RFID.

**Computação:** inclui a unidade de processamento como, por exemplo, microcontroladores, processadores e FPGAs, responsáveis por executar algoritmos locais nos objetos inteligentes.

**Serviços:** a IoT pode prover diversas classes de serviços, dentre elas, destacam-se os *Serviços de Identificação*, responsáveis por mapear Entidades Físicas (EF) (de interesse do usuário) em Entidades Virtuais (EV) como, por exemplo, a temperatura de um local físico em seu valor, coordenadas geográficas do sensor e instante da coleta; *Serviços de Agregação de Dados* que coletam e sumarizam dados homogêneos/heterogêneos obtidos dos objetos inteligentes; *Serviços de Colaboração e Inteligência* que agem sobre os serviços de agregação de dados para tomar decisões e reagir de modo adequado a um determinado cenário; e *Serviços de Ubiquidade* que visam prover serviços de colaboração e inteligência em qualquer momento e qualquer lugar em que eles sejam necessários.



**Figura 1.3. Blocos básicos da IoT**

**Semântica:** refere-se à habilidade de extração de conhecimento dos objetos na IoT. Trata da descoberta de conhecimento e uso eficiente dos recursos existentes na IoT, a partir dos dados existentes, com o objetivo de prover determinado serviço. Para tanto, podem ser usadas diversas técnicas como *Resource Description Framework (RDF)*, *Web Ontology Language (OWL)* e *Efficient XML Interchange (EXI)*.

#### 1.1.4. Objetivos do minicurso

Este capítulo tem por objetivo apresentar ao leitor uma visão geral da Internet das Coisas – IoT, o que inclui diversos aspectos das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs). Para isso, apresentaremos o significado e funcionalidade dos principais blocos relacionados à IoT.

Após a breve apresentação dos blocos da IoT, ficará evidente o quão ampla é a área. Em seguida, serão discutidos os seguintes blocos básicos: **Identificação, Comunicação e Serviços/Semântica**. A discussão tratará não apenas cada bloco individualmente, mas também como se relaciona com os demais. Esses blocos foram escolhidos por capturarem a essência da IoT e possibilitarem ao leitor condições de explorar com maior facilidade outros blocos da IoT.

#### 1.1.5. Estrutura do capítulo

Este capítulo é dividido em seis seções, sendo esta a primeira. A Seção 1.2 aborda pontos sobre os dispositivos e as tecnologias de comunicação para IoT. A Seção 1.3 dis-

cute sobre os softwares que orquestram a operação da IoT, pontuando a identificação única dos dispositivos com IPv6, bem como modelos de conectividade, protocolos de roteamento e aplicação para IoT, e ambientes de desenvolvimento. A Seção 1.4 apresenta duas práticas para consolidar o conteúdo visto até então. Essas práticas serão o elo para o conteúdo da Seção 1.5, a qual aborda o gerenciamento e análise de dados que permeiam os blocos básicos de semântica e serviços na IoT. Finalmente, a Seção 1.6 apresenta as considerações finais e destaca os pontos que não foram cobertos no capítulo, apresentando referências para que o leitor possa complementar seus estudos.

## 1.2. Dispositivos e Tecnologias de Comunicação

Esta seção aborda em mais detalhes a arquitetura básica dos dispositivos inteligentes e as tecnologias de comunicação, principalmente as soluções de comunicação sem fio que tendem a se popularizar no ambiente de IoT.

### 1.2.1. Arquiteturas básica dos dispositivos

A arquitetura básica dos objetos inteligentes é composta por quatro unidades: processamento/memória, comunicação, energia e sensores/atuadores. A Figura 1.4 apresenta uma visão geral da arquitetura de um dispositivo e a interligação entre seus componentes, os quais são descritos a seguir:

**(i) Unidade(s) de processamento/memória:** composta de uma memória interna para armazenamento de dados e programas, um microcontrolador e um conversor analógico-digital para receber sinais dos sensores. As CPUs utilizadas nesses dispositivos são, em geral, as mesmas utilizadas em siste-

mas embarcados e comumente não apresentam alto poder computacional. Frequentemente existe uma memória externa do tipo *flash*, que serve como memória secundária, por exemplo, para manter um “log” de dados. As características desejáveis para estas unidades são consumo reduzido de energia e ocupar o menor espaço possível.

**(ii) Unidade(s) de comunicação:** consiste de pelo menos um canal de comunicação com ou sem fio, sendo mais comum o meio sem fio. Neste último caso, a maioria das plataformas usam rádio de baixo custo e baixa potência. Como consequência, a comunicação é de curto alcance e apresentam perdas frequentes. Esta unidade básica será objeto de estudo mais detalhado na próxima seção.

**(iii) Fonte de energia:** responsável por fornecer energia aos componentes do objeto inteligente. Normalmente, a fonte de energia consiste de uma bateria (recarregável ou não) e um conversor AC-DC e tem a função de alimentar os componentes. Entretanto, existem

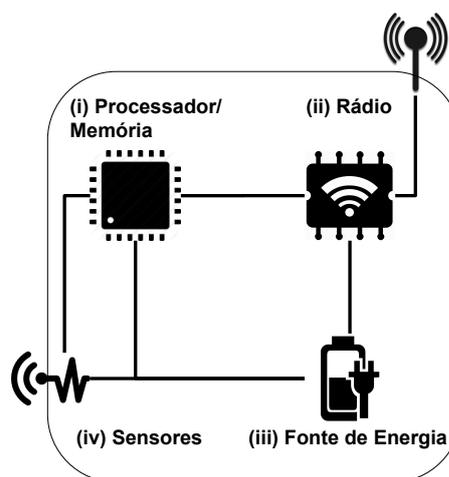


Figura 1.4. Arquitetura dos dispositivos

outras fontes de alimentação como energia elétrica, solar e mesmo a captura de energia do ambiente através de técnicas de conversão (e.g., energia mecânica em energia elétrica), conhecidas como *energy harvesting*.

**(iv) Unidade(s) de sensor(es)/atuador(es):** realizam o monitoramento do ambiente no qual o objeto se encontra. Os sensores capturam valores de grandezas físicas como temperatura, umidade, pressão e presença. Atualmente, existem literalmente centenas de sensores diferentes que são capazes de capturar essas grandezas. Atuadores, como o nome indica, são dispositivos que produzem alguma ação, atendendo a comandos que podem ser manuais, elétricos ou mecânicos.

### 1.2.2. Tecnologias de comunicação

Esta seção trata das principais tecnologias de comunicação utilizadas em IoT, identificando as características mais relevantes de cada um delas.

**Ethernet.** O padrão Ethernet (IEEE 802.3) foi oficializado em 1983 pelo IEEE e está presente em grande parte das redes locais com fio existentes atualmente. Sua popularidade se deve à simplicidade, facilidade de adaptação, manutenção e custo. Atualmente, existem dois tipos de cabos: par trançado e fibra óptica, que oferecem taxas de comunicação diferentes. Os cabos de par trançado podem atingir taxas de até 1 Gbps (categoria 5), limitados a 100 m (para distâncias maiores é necessário o uso de repetidores). Os cabos de fibra óptica alcançam taxas de 10 Gbps, limitados a 2000 m [Tanenbaum 2011]. O uso do padrão Ethernet é sugerido para dispositivos fixos, i.e., sem mobilidade, o que pode ser inadequado para essas aplicações.

**Wi-Fi.** A tecnologia Wi-Fi é uma solução de comunicação sem fio bastante popular, pois está presente nos mais diversos lugares, fazendo parte do cotidiano de casas, escritórios, indústrias, lojas comerciais e até espaços públicos das cidades. O padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi<sup>1</sup>) define um conjunto de padrões de transmissão e codificação. Desde o seu lançamento em 1997, já foram propostas novas versões do padrão IEEE 802.11 e, atualmente, a versão IEEE 802.11ac prevê taxas de comunicação de 600 Mbps ou 1300 Mbps.

O Wi-Fi foi desenvolvido como uma alternativa ao padrão cabeado Ethernet, com pouca preocupação com dispositivos que possuem consumo energético limitado, como é o caso das aplicações para IoT. Assim, não se espera que muitos dispositivos utilizados em IoT adotem o padrão Wi-Fi como principal protocolo de comunicação. Contudo, o Wi-Fi possui algumas vantagens, como alcance de conexão e vazão, o que o torna adequado para navegação na Internet em dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets*. A principal desvantagem do Wi-Fi é o maior consumo de energia, quando comparado com outras tecnologias de comunicação sem fio.

**ZigBee.** O padrão ZigBee é baseado na especificação do protocolo IEEE 802.15.4 para a camada de enlace. As suas principais características são a baixa vazão, reduzido consumo energético e baixo custo. O ZigBee opera na frequência 2.4 GHz (faixa ISM), mas é capaz de operar em outras duas frequências, 868 MHz e 915 MHz. Essa tecnologia pode

---

<sup>1</sup>Por um abuso de linguagem, chamamos o padrão IEEE 802.11 de Wi-Fi, que na verdade representa a “Aliança Wi-Fi” (<http://www.wi-fi.org/>) responsável por certificar a conformidade de produtos que seguem a norma IEEE 802.11.

alcançar uma taxa máxima de 250 kbps, mas na prática temos taxas inferiores. O ZigBee também permite que os dispositivos entrem em modo *sleep* por longos intervalos de tempo para economizar energia e, assim, estendendo a vida útil do dispositivo.

O padrão ZigBee é mantido pela *ZigBee Alliance*, organização que é responsável por gerir o protocolo e garantir a interoperabilidade entre dispositivos. O padrão ZigBee pode ser usado com o protocolo IP (incluindo o IPv6) e também utilizando a topologia em malha (*Mesh*<sup>2</sup>). O ZigBee já é adotado em aplicações residenciais e comerciais e sua utilização em IoT depende de um *gateway*, dispositivo responsável por permitir a comunicação entre dispositivos que usam ZigBee e os que não usam.

**Bluetooth Low Energy.** O Bluetooth é um protocolo de comunicação proposto pela Ericsson para substituir a comunicação serial RS-232<sup>3</sup>. Atualmente, o *Bluetooth Special Interest Group* é responsável por criar, testar e manter essa tecnologia. Além disso, Bluetooth é uma das principais tecnologias de rede sem fio para PANs – *Personal Area Networks*, que é utilizada em *smartphones*, *headsets*, PCs e outros dispositivos. O Bluetooth se divide em dois grupos: Bluetooth clássico que por sua vez se divide em *Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR)*, que são as versões 2.0 ou anteriores e o *Bluetooth High Speed (HS)*, versão 3.0; e o *Bluetooth Low Energy (BLE)*, versão 4.0 ou superior. As versões mais antigas do Bluetooth, focadas em aumentar a taxa de comunicação, tornou o protocolo mais complexo e, por consequência, não otimizado para dispositivos com limitações energéticas. Ao contrário das versões anteriores, o BLE possui especificação voltada para baixo consumo de energia, permitindo dispositivos que usam baterias do tamanho de moedas (*coin cell batteries*).

Atualmente, o BLE possui três versões: 4.0, 4.1 e 4.2, lançadas em 2010, 2013 e 2014, respectivamente. BLE 4.0 e 4.1 possuem um máximo de mensagem (*Maximum Transmit Unit – MTU*) de 27 bytes, diferentemente da mais nova versão (BLE 4.2) que possui 251 bytes. Outra diferença entre as versões é o tipo de topologia de rede que cada versão pode criar. Na versão 4.0, apenas a topologia estrela é disponível, ou seja, cada dispositivo pode atuar exclusivamente como *master* ou como *slave*. A partir da versão 4.1, um dispositivo é capaz de atuar como *master* ou *slave* simultaneamente, permitindo a criação de topologias em malha. Recentemente foi proposta uma camada de adaptação para dispositivos BLE, similar ao padrão 6LoWPAN, chamada de 6LoBTLE. A especificação do 6LoBTLE pode ser consultada na RFC 7668<sup>4</sup>.

**3G/4G.** Os padrões de telefonia celular 3G/4G também podem ser aplicados à IoT. Projetos que precisam alcançar grandes distâncias podem aproveitar as redes de telefonia celular 3G/4G. Por outro lado, o consumo energético da tecnologia 3G/4G é alto em comparação a outras tecnologias. Porém, a sua utilização em locais afastados e baixa mobilidade podem compensar esse gasto. No Brasil, as frequências utilizadas para o 3G são 1900 MHz e 2100 MHz (UMTS), enquanto o padrão 4G (LTE) utiliza a frequência de 2500 MHz. A taxa de comunicação alcançada no padrão 3G é de 1 Mbps e no padrão 4G

---

<sup>2</sup><http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications/>

<sup>3</sup><https://www.bluetooth.com/what-is-bluetooth-technology/bluetooth-fact-or-fiction>

<sup>4</sup><https://tools.ietf.org/html/rfc7668>

10 Mbps <sup>5</sup>.

LoRaWAN is a Low Power Wide Area Network (LPWAN) specification intended for wireless battery operated Things in regional, national or global network. LoRaWAN target key requirements of internet of things such as secure bi-directional communication, mobility and localization services.

**LoRaWan.** A especificação LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) foi projetada para criar redes de longa distância, numa escala regional, nacional ou global, formada por dispositivos operados por bateria e com capacidade de comunicação sem fio. A especificação LoRaWan trata de requisitos presentes na IoT como comunicação segura e bi-direcional, mobilidade e tratamento de serviços de localização. Além disso, o padrão oferece suporte a IPv6, adaptação ao 6LoWPAN e funciona sobre a topologia estrela <sup>6</sup>. O fator atrativo do LoRAWAN é o seu baixo custo e a quantidade de empresas de *hardware* que estão o adotando. A taxa de comunicação alcança valores entre 300 bps a 50 kbps. O consumo de energia na LoRaWan é considerado pequena, o que permite aos dispositivos se manterem ativos por longos períodos. A LoRaWANs utiliza a frequência ISM sub-GHz fazendo com que as ondas eletromagnéticas penetrem grandes estruturas e superfícies, a distâncias de 2 km a 5 km em meio urbano e 45 km no meio rural. Os valores de frequência mais usadas pelo LoRaWan são: 109 MHz, 433 MHz, 866 MHz e 915 MHz. O MTU adotado pelo padrão LoRaWAN é de 256 bytes<sup>7</sup>.

**Sigfox.** O SigFox<sup>8</sup> utiliza a tecnologia *Ultra Narrow Band* (UNB), projetada para lidar com pequenas taxas de transferência de dados. Essa tecnologia ainda é bastante recente e já possui bastante aceitação, chegando a dezenas de milhares de dispositivos espalhados pela Europa e América do Norte. A SigFox atua como uma operadora para IoT, com suporte a uma série de dispositivos. A principal função é abstrair dificuldades de conexão e prover uma API para que os usuários implementem sistemas IoT com maior facilidade. O raio de cobertura oficialmente relatada, em zonas urbanas, está entre 3 km e 10 km e em zonas rurais entre 30 km a 50 km. A taxa de comunicação varia entre 10 bps e 1000 bps e o MTU utilizado é de 96 bytes. O SigFox possui baixo consumo de energia e opera na faixa de 900 MHz.

A Tabela 1.1 resume as tecnologias de comunicação apresentadas nesta seção. As principais características de cada uma são elencadas, o que permite compará-las. Em particular, destaca-se a grande variedade de possibilidades para conectar dispositivos. Portanto, é preciso ponderar acerca das características das tecnologias e finalidade do dispositivo para escolher a melhor forma de conectá-lo.

### 1.2.3. Perspectivas e desafios sobre os objetos inteligentes

A evolução nas tecnologias de hardware utilizadas em RFID, RSSF, e, consequentemente, na IoT é impressionante quando olhamos apenas a última década. Os dispositivos estão cada vez menores e possuem mais recursos. Pode-se esperar ainda que essa evolução continue e, no futuro, possivelmente veremos outras tecnologias de hardware

---

<sup>5</sup><https://www.opensensors.io/connectivity>

<sup>6</sup><http://www.semtech.com/wireless-rf/lora/LoRa-FAQs.pdf>

<sup>7</sup><https://www.lora-alliance.org>

<sup>8</sup><http://makers.sigfox.com>

Protocolo	Alcance	Frequência	Taxa	IPv6	Topologia
Ethernet	100/2000 m	N/A	10 Gbps	Sim	Variada
Wi-Fi	50 m	2.4/5 GHz	1300 Mbps	Sim	Estrela
BLE	80 m	2.4 GHz	1 Mbps	Sim*	Estrela/Mesh
ZigBee	100 m	915 MHz/2.4 GHz	250 kbps	Sim	Estrela/Mesh
3G/4G	35/200 km	1900/2100/2500 MHz	1/10 Mbps	Sim	Estrela
SigFox	10/50 km	868/902 MHz	10–1000 bps	–	–
LoraWan	2/5 km	Sub-GHz	0.3-50 kbps	Sim	Estrela

**Tabela 1.1. Comparação entre as tecnologias de comunicação**

empregadas na IoT, diferentes das de hoje. Atualmente, temos dispositivos inteligentes como sistemas-em-um-chip (*system on a chip* – SoC) [Vasseur and Dunkels 2010], que claramente é uma evolução quando analisamos os últimos 10 a 15 anos. Esta seção trata das perspectivas e desafios para a IoT. A seguir, serão abordados dois pontos centrais. No primeiro, a questão da fonte de energia e o segundo as futuras tecnologias de hardware para dispositivo IoT.

### 1.2.3.1. Bateria e Colheita de Energia (*Energy Harvesting*)

Como mostrado na Figura 1.4, os dispositivos da IoT requerem uma fonte de energia. Atualmente, os objetos inteligentes são alimentados, em geral, por baterias, muitas vezes não recarregáveis. No entanto, existem outras fontes de alimentação como energia elétrica e solar. As baterias (recarregáveis ou não) são as fontes de alimentação mais empregadas nos dispositivos de IoT, embora não sejam as mais adequadas para a tarefa. Isto porque, em geral, os dispositivos estão em locais de difícil acesso (e.g., embutidos em outros dispositivos) ou simplesmente não é desejável manipulá-los fisicamente para substituir as baterias. Assim, tanto o hardware quando o software devem ser projetados para estender ao máximo a vida útil desses dispositivos [RERUM 2015].

Uma possível estratégia para mitigar o problema da energia é fazer uso da técnica de colheita de energia (do inglês *Energy Harvesting*) [Ramos et al. 2012]. A estratégia consiste em transformar energia de fontes externas ao dispositivo como, por exemplo, solar, térmica, eólica e cinética em energia elétrica e armazená-la em uma bateria recarregável. A energia colhida (geralmente em pequenas quantidades) é armazenada e deve ser utilizada para suprir as necessidades dos objetos como comunicação e processamento [Liu et al. 2013]. Contudo, a colheita de energia também traz ao menos um outro desafio que discutiremos a seguir, o qual pode ser o ponto de partida para novas pesquisas.

Caso os dispositivos tenham a capacidade de colher energia do ambiente onde estão inseridos, surgem diversas questões a serem tratadas. Por exemplo, como programar as atividades que o dispositivo deve executar considerando o orçamento de energia (*energy budget*)? Em outras palavras, como gastar a energia em função das atividades que devem ser feitas? Para exemplificar, imagine a situação na qual o dispositivo deve realizar tarefas durante 24 horas/dia. No entanto, somente quando há luz do sol é possível

captar energia do ambiente e o dispositivo não está acessível fisicamente. Além disso, sabe-se que a carga da bateria não consegue fornecer energia para 24 horas de operação. Sendo assim, as atividades do dispositivo devem ser realizadas de modo intermitente, ou seja, alterando entre realizar os comandos requeridos e entrar em modo de espera ou de baixa potência (*sleep mode*). Portanto, a atividade deve ser realizada de modo inteligente dado a demanda de atividades e orçamento de energia residual e adquirida do ambiente. Técnicas mais sofisticadas podem ainda adaptar a computação a ser feita em função da energia disponível ou de expectativas de se ter energia no futuro, em função do que foi possível captar de energia do passado. Nesse caso, isso envolve técnicas de predição.

### 1.2.3.2. Tecnologias de hardware

Considerando a discussão anterior, fica claro que os objetos inteligentes e tecnologias de comunicação apresentam diferentes características e limitações. À medida que os dispositivos de IoT diminuem, por um lado as limitações tendem a aumentar devido ao espaço reduzido, mas por outro podemos ter avanços tecnológicos que mitiguem essas restrições. Por exemplo, anos atrás foi prevista a possibilidade de existirem dispositivos em escala nanométrica, o que já é uma realidade com os *microelectromechanical systems (MEMS)* [Angell et al. 1983]. Já hoje, existem propostas de utilizarmos *Claytronics* e *Programmable Matter* [Goldstein et al. 2005], que consistem em combinar robôs de escala nanométrica (“*claytronic atoms*” ou “*catoms*”) para formar outras máquinas. Os *catoms* eventualmente serão capazes de se comunicarem, moverem e conectarem com outros *catoms* para apresentar diferentes formas e utilidades. Uma outra perspectiva futura quanto ao hardware diz respeito aos SoCs, onde um circuito integrado possui todos os componentes de um elemento computacional. Para o caso dos objetos inteligentes, esse sistema terá rádio, microcontrolador e sensores/atuadores. Entretanto, atualmente isso é um problema, pois o rádio requer um arranjo sofisticado para ser posto em um único chip [Vasseur and Dunkels 2010].

Há poucos anos atrás, era possível apontar o fator custo como limitante para adoção e desenvolvimento de objetos inteligentes. Entretanto, hoje é possível encontrar soluções de IoT disponíveis no mercado de baixo custo. Para esse segmento, é possível afirmar que o custo do hardware já é acessível, se analisarmos o preço de produtos como o Raspberry Pi, Arduino e similares que permitem desde a prototipagem até a produção final de soluções de IoT a baixo custo. Por exemplo, é possível encontrar o Raspberry Pi ao custo de US\$ 35.

## 1.3. Softwares e Ambientes de Desenvolvidos para IoT

Esta seção aborda assuntos referentes à camada de software que orquestra a lógica de operação dos objetos inteligentes. O bloco básico de identificação e os mecanismos de comunicação são os pontos centrais da seção. Além disso, serão descritos os sistemas operacionais para IoT, bem como os principais ambientes de desenvolvimento. O tópico, a seguir, apresentará alguns argumentos e requisitos para softwares utilizados na IoT. Os desdobramentos dos pontos levantados serão objetos de análise ao longo da seção.

### 1.3.1. Software para rede de objetos inteligentes

RSSF foi objeto de grande análise por pesquisadores tanto da academia quanto da indústria nos últimos anos como exposto na Seção 1.1. A interconexão entre as RSSF e a Internet foi uma evolução natural. Entretanto, o uso dos protocolos da Internet (arquitetura TCP/IP), sem modificações, é impraticável nos dispositivos com recursos limitados, os quais são comuns na IoT. Para alcançar as demandas da IoT por escalabilidade e robustez, a experiência em RSSF mostra que são necessários algoritmos e protocolos especializados como, por exemplo, protocolos que viabilizem processamento ao longo da rede (*in-network processing*) [Santos et al. 2015b, Fasolo et al. 2007] para mitigar as restrições impostas pelos dispositivos e prover escalabilidade e eficiência. Por outro lado, a arquitetura fim-a-fim da Internet não foi planejada para essas exigências (e.g., dezenas de milhares de dispositivos em uma única sub-rede e limitações de energia). Portanto, tal arquitetura necessita de ajustes para comportar essas novas demandas.

As RSSF e sua evolução, a IoT, cresceram em um ambiente com maior liberdade de desenvolvimento do que a Internet como, por exemplo, a questão de compatibilidade. Diante desta autonomia diversas ideias surgiram tanto do ponto de vista de software quanto de hardware. Entretanto, muitas dessas ideias não avançaram, pois não eram completamente interoperáveis com a arquitetura TCP/IP da Internet. Essas novas ideias, que não empregam a arquitetura da Internet, foram obrigadas a usar um *gateway* para trocar informações entre os objetos inteligentes e elementos na Internet. A implementação de um *gateway* é, em geral, complexa e o seu gerenciamento é complicado, pois além de realizarem funções de tradução, devem tratar da semântica de serviços para a camada de aplicação. A complexidade destas funções torna o *gateway* um gargalo para a IoT em dois sentidos. No primeiro, toda informação de e para a rede de objetos inteligentes transita através do *gateway*. No segundo, a lógica de operação da Internet diz que a inteligência do sistema deve ficar nas pontas [Saltzer et al. 1984], porém com o emprego dos *gateways* a inteligência da IoT fica no meio da rede, o que contradiz com os princípios da arquitetura da Internet. Para tratar desses problemas a *Internet Engineering Task Force (IETF)* criou dois grupos para gerenciar, padronizar e levantar os requisitos para as redes de baixa potência (*Low-Power and Lossy Networks (LLN)*) relacionadas a seguir:

**6LoWPAN:** o *IPv6 in Low-Power Wireless Personal Area Networks Working Group* ficou responsável por padronizar o *Internet Protocol version 6 (IPv6)* para redes que fazem uso de rádios sobre o padrão IEEE 802.15.4 que, por sua vez, especifica as regras das camada mais baixas (enlace e física) para redes sem fio pessoais de baixas potência de transmissão.

**RoLL:** o *Routing over Low-Power and Lossy Links Working Group* ficou responsável por padronizar o protocolo de roteamento que utilizará o IPv6 em dispositivos com limitações de recursos. O grupo já definiu o protocolo: *IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)*. Esse protocolo representa o estado-da-arte em roteamento para IoT, o qual constrói uma topologia robusta para comunicação na Internet das Coisas. O RPL será objeto de discussão mais adiante.

### 1.3.2. Arquitetura para IoT

Para conectar bilhões de objetos inteligentes à Internet, deve-se ter uma arquitetura flexível. Na literatura, temos uma variedade de propostas de arquiteturas sofisticadas, que se baseiam nas necessidades da academia e indústria [Al-Fuqaha et al. 2015]. O modelo básico de arquitetura apresenta três camadas, como ilustrado na Figura 1.5. A primeira camada é a de objetos inteligentes ou camada de percepção. Esta camada representa os objetos físicos, os quais utilizam sensores para coletarem e processarem informações. Na camada de rede, as abstrações das tecnologias de comunicação, serviços de gerenciamento, roteamento e identificação devem ser realizados. Logo acima, encontra-se a camada de aplicação, a qual é responsável por prover serviços para os clientes. Por exemplo, uma aplicação solicita medições de temperatura e umidade para clientes que requisitam estas informações.

### 1.3.3. IP para IoT



**Figura 1.5. Arquitetura para IoT**

O protocolo IPv4 foi o padrão utilizado para endereçar os dispositivos em rede e criar a “cola” da Internet, i.e., para estar conectado à Internet era necessário ter o protocolo IP. No entanto, não se imaginou que a Internet cresceria e poderia ter dezenas de milhares de pontos finais em uma única sub-rede, tal como agora é previsto para a IoT (veja Seção 1.1). O crescimento da rede mundial de computadores levou ao esgotamento de endereços IPv4 disponíveis. Isto mostrou que o IPv4 não era escalável o suficiente para atender a demanda da IoT.

O IPv6 é uma abordagem mais eficaz para solucionar a escassez de endereços IPv4. Os 32 bits alocados originalmente para o protocolo IPv4 foram expandidos para 128 bits, aumentando imensamente a quantidade de dispositivos endereçáveis na Internet. Na IoT, os elementos da rede são endereçados unicamente usando o IPv6 e, geralmente, têm o objetivo de enviar pequenas quantidades de dados obtidos pelos dispositivos. Contudo, o IPv6 tem um tamanho de pacote maior que o tamanho do quadro dos protocolos usados pelos dispositivos na IoT (o pacote IPv6 é transmitido dentro da área de dados do quadro do protocolo de acesso ao meio). Por exemplo, o padrão IEEE 802.15.4, usado para acesso ao meio físico de comunicação, limita os pacotes a 128 bytes. Para resolver esse problema, a IETF criou o 6LoWPAN [Kushalnagar et al. 2007].

6LoWPAN<sup>9</sup> é uma camada de adaptação primariamente desenvolvida para o padrão IEEE 802.15.4. A principal ideia é realizar a compressão de pacotes IPv6 (ID-6lowpan-hc<sup>10</sup>), permitindo a dispositivos com baixo poder computacional o uso do IPv6. A compressão do 6LoWPAN é possível através da utilização de informações de protocolos presentes em outras camadas. Por exemplo, o 6LoWPAN pode utilizar parte do

<sup>9</sup><https://tools.ietf.org/html/rfc4919>

<sup>10</sup><https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6lowpan-hc-15>

endereço MAC do dispositivo para atribuir um endereço IPv6 para o objeto inteligente. Desta forma, o 6LoWPAN requer menos bits que o IPv6 para realizar o endereçamento.

O pesquisador Adam Dunkels<sup>11</sup> realizou uma série de contribuições na área da Internet das Coisas. Três de suas principais contribuições são as implementações da pilha TCP/IP para dispositivos de baixa potência. Estas implementações são conhecidas como *low weight IP* (lwIP), o micro IP ( $\mu$ IP) e o sistema operacional para IoT Contiki.

A lwIP é uma implementação reduzida da pilha TCP/IP para sistemas embarcados<sup>12</sup>. A lwIP possui mais recursos do que a pilha  $\mu$ IP, discutida a seguir. Porém, a lwIP pode prover uma vazão maior. Atualmente esta pilha de protocolos é mantida por desenvolvedores espalhados pelo mundo<sup>13</sup>. A lwIP é utilizada por vários fabricantes de sistemas embarcados como, por exemplo, Xilinx e Altera. lwIP conta com os seguintes protocolos: IP, ICMP, UDP, TCP, IGMP, ARP, PPPoS, PPPoE. As aplicações incluídas são: servidor HTTP, cliente DHCP, cliente DNS, ping, cliente SMTP e outros.

O  $\mu$ IP (Micro IP) é uma das menores pilhas TCP/IP existentes<sup>14</sup>. Desenvolvida para pequenos microcontroladores (processadores de 8 ou 16 bits), onde o tamanho do código e memória RAM disponível são escassos,  $\mu$ IP precisa de no máximo 5 kilobytes de espaço de código e de poucas centenas de bytes de RAM. Atualmente, o  $\mu$ IP foi portado para vários sistemas<sup>15</sup> e integra o Contiki.

#### 1.3.4. Modelos de conectividade em redes de objetos inteligentes

Nesta seção, serão abordados os modelos de conectividade para uma rede IPv6 de objetos inteligentes. Os modelos de conectividade serão classificados como um espectro que varia de uma rede de objetos inteligentes autônoma sem conexão com a Internet até a “autêntica” *Internet of Things*, na qual os objetos possuem acesso à Internet efetivamente. As redes de objetos inteligentes serão parte de nossas vidas nos próximos anos. Por isso, entender as bases da IoT no que tange seus paradigmas de comunicação e modelos de conectividade é de grande importância, pois estes dois quesitos serão as chaves para construir novas aplicações para a IoT. A Figura 1.6 destaca três modelos de conectividade de uma rede de objetos inteligentes. A seguir, serão discutidos cada um dos modelos de conectividade: **Rede autônoma de objetos inteligentes:** neste modelo a rede de objetos não possui conexão com a Internet “pública”. Existem diversos casos de uso para este modelo como, por exemplo, em uma rede de automação industrial (e.g., usina nuclear). Pode-se requerer uma rede de objetos conectados entre si, porém completamente inacessível externamente, ou seja, o uso da rede é estritamente interno da corporação. A Figura 1.6 (I) apresenta uma abordagem esquemática do modelo.

Uma questão que pode ser levantada aqui é: “Neste modelo de conectividade é necessário que os objetos inteligentes sejam endereçados com IP?” Para responder a esta questão é preciso refletir sobre a experiência passada com o IP em redes convencionais. O IP apresenta diversas características que indicam um sim como resposta. Por exemplo,

---

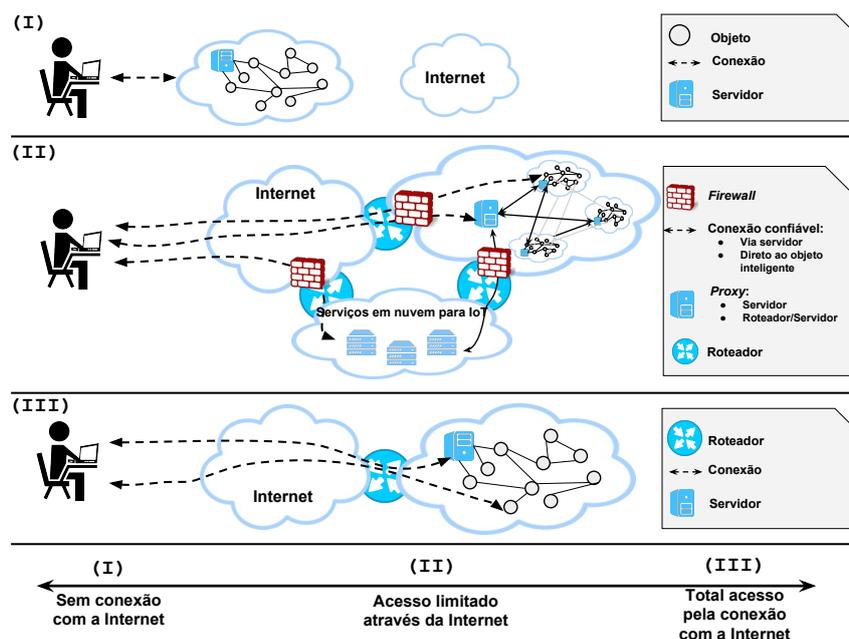
<sup>11</sup><http://www.dunkels.com/adam/>

<sup>12</sup><http://www.ece.ualberta.ca/~cmpe401/docs/lwip.pdf>

<sup>13</sup><http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>

<sup>14</sup><https://github.com/adamdunkels/uip>

<sup>15</sup><http://www.dunkels.com/adam/software.html>



**Figura 1.6. Modelos de conectividade dos objetos inteligentes. (I) Rede autônoma na qual os objetos inteligentes não possuem conexão com a Internet; (II) Rede de objetos inteligentes limitada, pois o acesso aos dispositivos é restrito; (III) IoT “autêntica” na qual os objetos estão conectados à Internet**

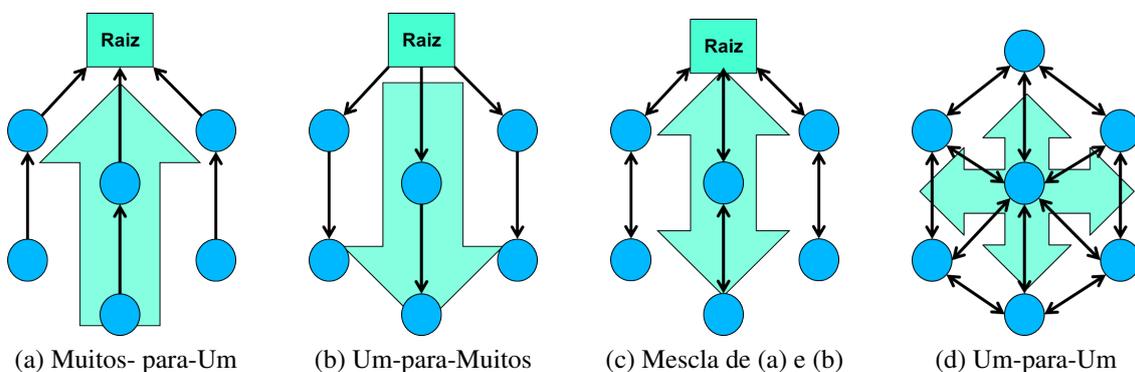
a arquitetura TCP/IP é interoperável, no sentido de que ela opera sobre as camadas de enlace e física com diferentes características. Outro argumento a favor do sim, é que o IP é versátil e evolutivo, pois a arquitetura é baseada no princípio fim-a-fim, em que a inteligência da rede (aplicações) residem nos pontos finais, enquanto a rede é mantida simples (somente encaminhando pacotes). Isto permitiu a evolução contínua do protocolo ao longo do tempo. Tendo dito isto, é válido alegar que ao usar IP neste modelo, e os demais apresentados a seguir, a rede manterá compatibilidade com a arquitetura da Internet e estará de acordo com as tendências regidas pelos grupos RoLL e 6LoWPAN.

**Internet estendida:** o termo “Internet estendida” refere-se ao posicionamento “central” deste modelo de conectividade em relação à rede de objetos autônomos e a “autêntica” IoT. Em outras palavras, este modelo apresenta as redes de objetos inteligentes parcialmente ou completamente conectadas à Internet, porém com requisitos apropriados de proteção e segurança [Vasseur and Dunkels 2010]. Aplicações para Cidades Inteligentes (*Smart Cities*) são exemplos desse modelo de conectividade. Essas aplicações produzirão informações úteis para seus habitantes terem uma melhor qualidade de vida e tomar decisões importantes diariamente. Para viabilizar as cidades inteligentes, pode-se usar o modelo apresentado na Figura 1.6 (II), em que o acesso à rede de objetos se dá via *firewall* e *proxy*, os quais possuem a tarefa de controle de acesso seguro às redes privadas de objetos inteligentes. Deste modo, o modelo de conectividade “estende” a Internet por permitir o acesso aos objetos inteligentes que até então estavam isolados.

**Internet das Coisas:** este modelo, no espectro considerado, é o extremo oposto ao mo-

delo de rede autônoma de objetos. Na IoT, os objetos inteligentes estão verdadeiramente conectados à Internet. Deste modo, os objetos podem prover serviços tais como quaisquer outros dispositivos na Internet, por exemplo, um objeto inteligente pode ser um servidor Web. Qualquer usuário da Internet, seja humano ou máquina, poderá ter acesso aos recursos dos objetos inteligentes. Como mostrado na Figura 1.6 (III), o acesso se dá conectando-se diretamente com o objeto ou através de um *proxy*<sup>16</sup>. Estes servidores podem estar localizados dentro ou fora da sub-rede de objetos inteligentes e possuem a tarefa de coletar informações dos dispositivos. Ao usar o *proxy* tem-se que a Internet conecta o usuário ao servidor *proxy*, o qual está conectado aos dispositivos. Assim, técnicas de processamento dentro da rede (*in-networking processing*) podem ser utilizadas, na rede entre o *proxy* e os dispositivos, para preservar os recursos e manter o princípio fim-a-fim.

### 1.3.5. Paradigmas de comunicação para objetos inteligentes



**Figura 1.7. Paradigmas de comunicação**

A IoT é uma evolução e combinação de diversas tecnologias como discutido na Seção 1.1. Neste sentido, há interseção entre RSSF e IoT no que tange os paradigmas de comunicação. Esta seção aborda tais paradigmas, classificando-os em quatro categorias como mostrado na Figura 1.7. Os paradigmas diferem significativamente, sendo assim o modo de comunicação pode acarretar em maior ou menor impacto no uso dos recursos, em especial de memória, energia e na viabilidade de aplicações sobre a rede. A seguir, cada um dos paradigmas será descrito, bem como exemplificado através de um protocolo que o implementa:

**Muitos-para-Um (*Many-to-One*):** os objetos inteligentes reportam informações, as quais são coletadas por estações base (raiz na Figura 1.7). Este paradigma é conhecido como coleta de dados, sendo o mais comum dos paradigmas, visto que atende às demandas de comunicação de muitas aplicações. Para realizar a coleta de dados, cria-se uma árvore de roteamento com raiz nas estações base. Em geral, este paradigma não acarreta em grande consumo de memória e energia. Entretanto, aplicações que necessitam de confirmação de entrega de dados são inviabilizadas, pois não existem rotas reversas entre a raiz e os objetos na rede;

<sup>16</sup>Um *proxy* é um servidor (sistema de computador ou uma aplicação) que age como um intermediário para requisições de clientes solicitando recursos de outros servidores

O exemplo que ilustra o estado-da-arte deste paradigma é o *Collection Tree Protocol (CTP)* [Gnawali et al. 2009]. O CTP emprega a métrica *Expected Transmission count (ETX)* [Javaid et al. 2009] e Trickle [Levis et al. 2004] para, respectivamente, criar rotas de alta qualidade e manter tais rotas a baixo custo.

**Um-para-Muitos (*One-to-Many*):** é conhecido como disseminação de dados, o qual tem a característica reversa do paradigma de coleta de dados. Na disseminação de dados, as estações base comumente enviam comandos para um ou vários objetos da rede. O intuito, em geral, é reconfigurar ou modificar parâmetros dos dispositivos na rede. Para realizar a disseminação de dados pode-se, por exemplo, efetuar inundações na rede para alcançar os dispositivos alvo. Entretanto, não é possível confirmar se os dados enviados foram entregues tal como ocorre com o CTP para a coleta de dados. O custo em número de mensagens também pode ser alto, caso sejam realizadas diversas inundações na rede.

Deluge é um exemplo de protocolo de disseminação [Chlipala et al. 2004]. O protocolo é otimizado para disseminação para grandes quantidades de dados e faz isso utilizando a métrica ETX para encontrar rotas de alta qualidade;

**Um-para-Muitos e vice-versa (*One-to-Many and Many-to-One*):** é um paradigma que combina os dois anteriormente apresentados. Nesta abordagem, os objetos inteligentes podem se comunicar com as estações base e vice-versa. Isto amplia a gama de aplicações antes não possíveis, tal como protocolos de transporte confiáveis. Entretanto, o paradigma necessita de memória adicional para manter as rotas bi-direcionais.

O *eXtend Collection Tree Protocol (XCTP)* [Santos et al. 2015a] é um exemplo desta categoria. Os autores argumentam que o XCTP é uma extensão do CTP e, por esse motivo, mantém todas as características do CTP ao mesmo tempo que o estende ao viabilizar rotas reversas entre a raiz e os elementos da rede.

**Um-para-um (*Any-to-Any*):** esse paradigma é o mais geral possível, pois permite que quaisquer dois objetos inteligentes da rede se comuniquem. Por ser mais abrangente, esta abordagem é a mais complexa e, geralmente, exige maior quantidade de recursos, principalmente de armazenamento, pois se faz necessário manter rotas para todos os dispositivos alcançáveis na rede. Por outro lado, não apresenta restrições significativas para as aplicações, exceto se os recursos computacionais dos dispositivos forem bastante limitados.

O principal protocolo de roteamento da Internet das Coisas reside nesta categoria. O protocolo RPL, descrito em detalhes a seguir, é flexível o suficiente para permitir rotas um-para-um, além de possibilitar que elementos de rede com diferentes capacidades sejam empregados para otimizar o armazenamento das rotas. Ainda existe um modo de operação em que, o RPL, opera sob o paradigma muitos-para-um, sendo portanto, um protocolo flexível no que tange as suas opções de operação.

### 1.3.6. IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks

O *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)* é um protocolo de roteamento para LLNs, projetado e padronizado pelo *ROLL Working Group in the IETF*, sendo o protocolo padrão que utiliza IPv6 para LLNs.

### 1.3.6.1. Grafo Acíclico Direcionado

Dispositivos de rede executando RPL estão conectados de maneira acíclica. Assim, um Grafo Acíclico Direcionado Orientado ao Destino (DODAG, do inglês *Destination-Oriented Directed Acyclic Graph*) é criado, como mostra a Figura 1.8. Cada nó mantém a melhor rota para a raiz do DODAG. Para encontrar a melhor rota os nós usam uma função objetivo (OF) que define a métrica de roteamento (e.g., ETX da rota [Javaid et al. 2009]) a ser computada.

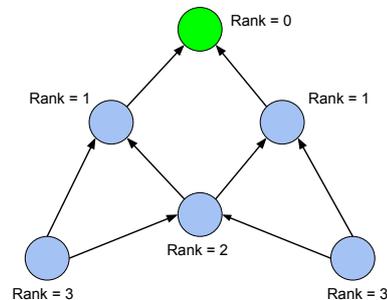


Figura 1.8. DODAG RPL

O RPL utiliza quatro tipos de mensagens de controle, descritas abaixo, para manter e atualizar as rotas. O processo de roteamento inicia pela construção do DAG. A raiz anuncia informações sobre seu DODAG (de um único nó) para todos vizinhos alcançáveis. Em cada nível da árvore de roteamento, os nós tomam decisões sobre rotas baseadas na OF. Uma vez que o nó se junta ao DODAG, ele escolhe uma raiz como seu pai e calcula seu *rank*, que é uma métrica que indica as coordenadas do nó na hierarquia da rede [Vasseur et al. 2011]. Os demais nós irão repetir esse processo de seleção do pai e notificação das informações do DODAG para possíveis novos dispositivos. Quando esse processo se estabiliza, o roteamento de dados pode então começar. O processo descrito cria rotas ascendentes (dos nós para uma raiz). Para construir as rotas descendentes o RPL emite mensagens especiais discutidas a seguir.

### 1.3.6.2. Mensagens

O RPL especifica três tipos de mensagens utilizando o ICMPv6: *DODAG Destination Advertisement Object* (DAO), *DODAG Information Object* (DIO) e *DODAG Information Solicitation Message* (DIS) descritas a seguir:

*DIO*: mensagens deste tipo são utilizadas para anunciar um DODAG e suas características. Assim, elas são usadas para a descoberta de DODAGs, sua formação e manutenção. O intervalo de envio de DIO é controlado de modo eficiente pelo algoritmo Trickle [Levis et al. 2004].

*DIS*: esse tipo de mensagem é similar a mensagens de solicitação de rotas (RS) do IPv6, e são usadas para descobrir DODAGs na vizinhança e solicitar DIOs de nós vizinhos, sem possuir corpo de mensagem.

*DAO*: mensagens DAO são utilizadas durante o processo de notificação de rotas descendentes. Elas são enviadas em sentido ascendente (dos nós que manifestam o desejo de receber mensagens para seus pais preferenciais) para propagar informações de destino ao longo do DODAG. Essas informações são utilizadas para o preenchimento das tabelas de roteamento descendente, que permitem o tráfego P2MP (ponto a multi-ponto) e P2P (ponto a ponto).

### 1.3.6.3. Rotas descendentes

As rotas descendentes, da raiz para os nós, são ativadas por meio de mensagens DAO propagadas como *unicast* por meio dos pais em direção à raiz. Essas mensagens contêm informações sobre quais prefixos pertencem a qual roteador RPL e quais prefixos podem ser alcançados através de qual roteador RPL. O protocolo especifica dois modos de operação para o roteamento descendente: *storing* e *non-storing*. Ambos os modos requerem a geração de mensagens DAO, que são enviadas e utilizadas de maneira diferente em cada modo de operação. Os dois modos de operação são descritos a seguir.

**Modo *storing*:** Neste modo, cada roteador RPL deve armazenar rotas para seus destinos em um DODAG. Essas informações são repassadas dos nós para seus pais preferenciais. Isso faz com que, em nós mais próximos da raiz, o armazenamento necessário seja definido pelo número de destinos na rede. Com isso, a memória necessária em um nó próximo à raiz e um outro distante da raiz pode variar drasticamente, o que faz com que algum tipo de implementação e manutenção administrativa contínua nos dispositivos sejam necessárias, conforme a rede evolui [Clausen et al. 2013]. Entretanto, tal intervenção é inviável, devido ao perfil dinâmico da rede.

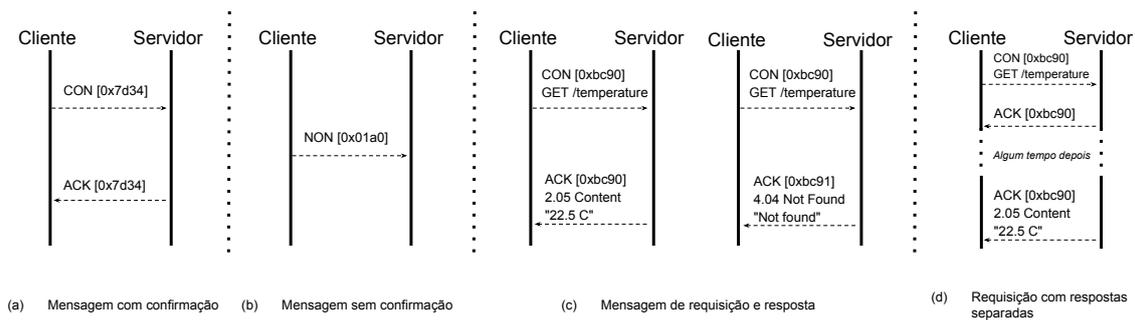
**Modo *non-storing*:** Neste modo, cada nó gera e envia mensagens DAO para a raiz do DODAG. O intervalo no qual o DAO é enviado varia de acordo com a implementação. Entretanto, a especificação do protocolo sugere que esse intervalo seja inversamente proporcional à distância do nó a raiz. Assim, um nó folha gera mais mensagens que um nó intermediário. Após coletar toda informação necessária, a raiz agrega essa informação. Se precisar enviar uma mensagem descendente na rede, a raiz deve utilizar um cabeçalho IPv6 para roteamento de origem (*source routing*). Dessa forma, os nós encaminham a mensagem até que ela alcance seu destino [Tsvetko 2011]. Ou seja, caso os nós não possuam capacidade de armazenamento para operarem no modo *storing*, a rede sofre maior risco de fragmentação e, portanto, perda de pacotes de dados, consumindo a capacidade da rede com o roteamento de origem [Clausen et al. 2013].

### 1.3.7. Protocolos da camada de aplicações para IoT

O protocolo HTTP é usado na Internet para acessar informações seguindo a estratégia requisição/resposta no paradigma cliente/servidor. O HTTP foi desenvolvido para redes com computadores tipo PC. Diferentemente dos PCs, os dispositivos usados na IoT possuem poder computacional restrito, o que limita a utilização do protocolo HTTP nesses elementos. Para resolver esse problema, foram desenvolvidos dois protocolos da camada de aplicação especificamente para recuperar informações de dispositivos com baixo poder computacional: CoAP e MQTT.

O *Constrained Application Protocol (CoAP)* é definido e mantido pelo *IETF Constrained RESTful Environments (CoRE) working group*<sup>17</sup>. O CoAP define uma forma de transferir dados tal como é feito através do *REpresentational State Transfer (REST)* e, para tanto, utiliza funcionalidades similares ao do HTTP tais como: *GET*, *POST*, *PUT*, *DELETE*. REST permite que clientes e servidores acessem ou consumam serviços Web de maneira fácil usando *Uniform Resource Identifiers (URIs)*. O CoAP é diferente do

<sup>17</sup><https://datatracker.ietf.org/doc/charter-ietf-core/>



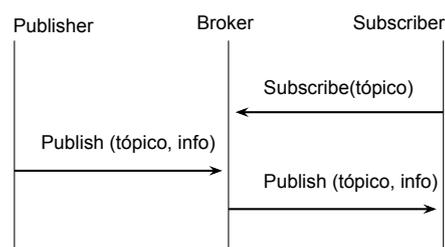
**Figura 1.9. Tipos de mensagem do CoAP**

REST por usar o protocolo UDP, o que o coloca como mais adequado para aplicações em IoT.

O CoAP apresenta duas camadas em sua arquitetura interna, permitindo que dispositivos de baixa potência possam interagir através de RESTfull. A primeira camada implementa os mecanismos de requisição/resposta. A segunda, detecta mensagens duplicadas e fornece comunicação confiável sobre o UDP. O CoAP utiliza quatro tipos de mensagens (Figura 1.9): *confirmable*, *non-confirmable*, *reset* e *acknowledgement*. A confiabilidade do protocolo CoAP é conseguida ao combinar as mensagens *confirmable* e *non-confirmable* sobre o UDP.

As URIs CoAP são utilizadas da seguinte forma `coap://URI`. Para facilitar o acesso aos recursos, existem algumas extensões que são utilizadas para integrar o CoAP aos *browsers*, por exemplo, a Copper para Firefox. Outras informações podem ser encontradas na RFC 7252<sup>18</sup> e o conjunto de implementações existentes podem ser encontradas no site de um dos autores do CoAP<sup>19</sup>.

O *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT) é um protocolo projetado para dispositivos extremamente limitados e utiliza a estratégia de *publish/subscribe* para transferir mensagens. O principal objetivo do MQTT é minimizar o uso de largura de banda da rede e recursos dos dispositivos. Além disso, o MQTT provê mecanismos para a garantia de entrega de mensagens. MQTT utiliza os protocolos das camadas de transporte e rede da arquitetura TCP/IP. O cabeçalho do protocolo MQTT pode ter tamanho fixo (dois bytes) ou variável. Um exemplo de uma implementação *open source* do MQTT é o Mosquitto<sup>20</sup>.



**Figura 1.10. *publish/subscribe***

O MQTT consiste de três componentes básicos: o *subscriber*, o *publisher* e o *broker*. A Figura 1.10 mostra a ordem de operação do MQTT. Inicialmente dispositivos

<sup>18</sup><https://tools.ietf.org/html/rfc7252>

<sup>19</sup><http://coap.technology>

<sup>20</sup><http://mosquitto.org>

se registram (*subscribe*) a um *broker* para obter informações sobre dados específicos, para que o *broker* os avise sempre que publicadores (*publishers*) publicarem os dados de interesse. Os dispositivos inteligentes (*publishers*) transmitem informações para os *subscriber* através do *broker*.

### 1.3.8. Ambientes de desenvolvimento

Assim como softwares para computadores de propósito geral, o software que executa no microcontrolador dentro de um objeto inteligente também é escrito em uma linguagem de programação e compilado para o código de máquina para o microcontrolador. O código de máquina é escrito na ROM do microcontrolador e quando o objeto inteligente é ligado, esse código é executado [Vasseur and Dunkels 2010].

#### 1.3.8.1. Sistemas Operacionais

Assim como os PCs, os objetos inteligentes também utilizam sistemas operacionais. Entretanto, como os objetos inteligentes possuem recursos físicos limitados, os SOs para esses objetos devem ser muito menores e consumir menos recursos. Esta seção descreve brevemente os dois principais sistemas operacionais para objetos inteligentes: Contiki e TinyOS, além do sistema operacional Android que opera em grande parte dos *smartphones* e algumas variações do sistema Linux orientadas à IoT. Todos esses sistemas operacionais são de código aberto. Ao final desta seção, a Tabela 1.2 apresenta uma comparação entre os principais sistemas apresentados.

**Contiki**<sup>21</sup>: é um SO leve para sistemas embarcados de rede, que fornece mecanismos para o desenvolvimento de softwares para IoT e mecanismos de comunicação que permitem a comunicação dos dispositivos inteligentes. Além disso, o Contiki também fornece bibliotecas para a alocação de memória, abstrações de comunicação e mecanismos de redes de rádios de baixa potência. O Contiki foi o primeiro SO para objetos inteligentes a fornecer comunicação IP com a pilha  $\mu$ IP TCP/IP e, em 2008, o sistema incorporou o  $\mu$ IPv6, a menor pilha IPv6. Por utilizar IP, o Contiki pode se comunicar diretamente com outros aplicativos baseados em IP e serviços Wweb [Vasseur and Dunkels 2010]. Tanto o sistema operacional quanto suas aplicações são implementados na linguagem C, o que faz o sistema ser altamente portátil [Dunkels et al. 2004].

**TinyOS**<sup>22</sup>: Assim como o Contiki, o TinyOS é um SO para redes de sensores e objetos inteligentes. Um programa do TinyOS é descrito em [Levis et al. 2005] como um grafo de componentes, cada um sendo uma entidade computacional independente que expõe uma ou mais interfaces. Os componentes podem ser chamados comandos (requisições a um componente para executar algum serviço), eventos (sinalizam a finalização desse serviço) ou tarefas (usadas para expressar a concorrência intra-componente). TinyOS possui um modelo de programação baseado em componentes, codificado pela linguagem NesC, um dialeto da linguagem C. O modelo de programação fornecido em NesC se baseia em componentes que encapsulam um conjunto específico de serviços, e se comunicam por meio de interfaces.

---

<sup>21</sup><https://github.com/contiki-os>

<sup>22</sup><https://github.com/tinyos>

Sistema	Min. RAM	Min. ROM	Linguagem
Contiki	< 2 KB	< 30 KB	C
TinyOS	< 1 KB	< 4 KB	nesC e oTcl
RIOT	~ 1.5 KB	~ 5 KB	C e C++
Snappy	128 MB	–	Python, C/C++, Node JS e outras
Raspbian	256 MB	–	Python, C/C++, Node JS e outras

**Tabela 1.2. Comparativo entre os principais SOs para IoT**

**Android**<sup>23</sup>: é uma plataforma para dispositivos móveis que inclui um SO, *middleware* e aplicativos<sup>24</sup>. Os vários componentes do SO são projetados como uma pilha, com o núcleo do Linux na camada mais baixa. Acima da camada do Linux, estão as bibliotecas nativas do Android, o que permite ao dispositivo manusear diferentes tipos de dados. Na mesma camada das bibliotecas está o *Android Runtime*, que possui um tipo de máquina virtual Java utilizada para a execução de aplicativos no dispositivo Android. A próxima camada está relacionada com o *framework* de aplicação, que fornece vários serviços de alto nível ou APIs para os desenvolvedores de aplicativos. Por fim, no topo da pilha, está a camada de aplicação.

**Linux**: com a popularização da IoT, alguns SOs baseados em Linux foram desenvolvidos. o RIOT<sup>25</sup> <sup>26</sup> foi desenvolvido por uma comunidade formada por empresas, acadêmicos e amadores, distribuídos em todo o mundo. Essa plataforma executa em 8, 16 ou 32 bits e possui suporte às linguagens C e C++. Além disso, possui suporte para IoT com implementações 6LoWPAN, IPv6, RPL, e UDP. O Ubuntu também possui sua versão IoT, chamada Ubuntu Core ou Snappy<sup>27</sup>. Essa versão é reduzida em comparação ao Ubuntu *desktop*, uma vez que exige apenas 128 MB de memória RAM e um processador de 600 MHz. O desenvolvimento pode ser feito em diversas linguagens, como o de uma aplicação Linux comum. Raspbian<sup>28</sup> é um SO baseado no Debian e otimizado para o hardware do Raspberry Pi. Oferece mais de 35 mil pacotes *deb* de software, que estão pré-compilados, para serem facilmente instalados no Raspberry Pi. O sistema está disponível em três versões: Raspbian Wheezy, DRaspbian Jessie e Raspbian Jessie Lite.

### 1.3.8.2. Emuladores e simuladores

Simulações e emulações são muito úteis durante a fase de avaliação de arquiteturas e protocolos para redes em geral. Esses ambientes de desenvolvimento permitem modelar uma rede de computadores arbitrária, especificando o comportamento dos elementos da rede, bem como os enlaces de comunicação. Esta seção apresenta os principais

<sup>23</sup>O Android é disponibilizado sob licença de código aberto, apesar da maior parte dos dispositivos apresentarem uma combinação de software livre e privado: <https://github.com/android>

<sup>24</sup><http://developer.android.com/guide/basics/what-is-android>

<sup>25</sup><http://www.riot-os.org/>

<sup>26</sup><https://github.com/RIOT-OS/RIOT>

<sup>27</sup><http://www.ubuntu.com/internet-of-things>

<sup>28</sup><https://www.raspbian.org/>

simuladores e emuladores de redes de computadores que possuem suporte para IoT.

Essencialmente, há diferenças entre os emuladores e simuladores como é destacado em [Bagula and Erasmus 2015]. Emulador é um sistema de hardware e/ou software que permite a um sistema de computador (chamado de *host*) se comportar como um outro sistema de computador (chamado de *guest*). Em outras palavras, o emulador se comporta exatamente como o *guest* permitindo ao *host* executar um software projetado para o sistema *guest*. Por exemplo, o emulador Cooja do Contiki permite a um computador se comportar como um dispositivo inteligente Tmote Sky<sup>29</sup>. Já o simulador, por sua vez, é modela (“imita”) uma situação da real ou hipotética em um computador. Com a simulação é possível estudar como o sistema simulado deve operar, caso o modelo reflita as características do mundo real.

A seguir, são apresentadas algumas dessas plataformas.

**Cooja:** é um emulador de aplicações do sistema operacional Contiki, desenvolvido na linguagem Java (Cooja – **Contiki OS Java**). As simulações no Cooja consistem em cenários onde cada nó possui um tipo, memória e um número de interfaces [Österlind]. Um nó no Cooja é um sistema Contiki real compilado e executado. Esse sistema é controlado e analisado pelo Cooja<sup>30</sup>, que possui uma interface para analisar e interagir com os nós, o que facilita o trabalho e a visualização da rede. Além disso, é possível criar cenários personalizados.

**ns-2/ns-3:** Ns-2 é um simulador de eventos discretos para rede de computadores de código aberto. As simulações para ns-2 são compostas por código em C++ e *scripts* oTcl. O código é utilizado para modelar o comportamento dos nós, enquanto os *scripts* controlam a simulação e especificam aspectos adicionais, como a topologia da rede. O ns-3 também é um simulador de eventos discretos, mas não é uma extensão de seu antecessor, ns-2. Assim como o ns-2, o ns-3 adota a linguagem C++ para a implementação dos códigos, mas não utiliza mais *scripts* oTcl. Com isso, as simulações podem ser implementadas em C++, com partes opcionais implementadas usando Python [Weingärtner et al. 2009].

**Tossim:** é o simulador de eventos discretos do SO TinyOS. Ao invés de compilar uma aplicação TinyOS para um nó sensor, os usuários podem compilá-lo para o TOSSIM, que é executado em um PC. No Tossim é possível simular milhares de nós, cada nó, na simulação, executa o mesmo programa TinyOS. O simulador se concentra em simular o TinyOS e sua execução, ao invés de simular o mundo real. Por isso, apesar de poder ser usado para entender as causas do comportamento observado no mundo real, não é capaz de capturar todos eles e pode não ser o mais fidedigno para avaliações [Levis and Lee 2010]. Na abstração do Tossim, a rede é um grafo orientado no qual cada vértice é um nó e cada aresta (enlace) tem uma probabilidade de erro de bit. O simulador fornece um conjunto de serviços que permitem interação com aplicativos externos [Levis et al. 2003].

**OMNet++/Castalia:** é um simulador de eventos discretos para modelar redes de comunicação, multiprocessadores e outros sistemas distribuídos ou paralelos [Varga and Hornig 2008]. O OMNet++ fornece o ferramental para criar simulações

---

<sup>29</sup><http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>

<sup>30</sup><https://github.com/contiki-os/contiki/wiki/An-Introduction-to-Cooja>

Nome	Suporte GUI	Licença	Linguagem	Sistema Operacional
Cooja	Sim	Código aberto	C	Linux
ns-2	Não	Código aberto	C++ e oTcl	GNU/Linux, FreeBSD, Mac OS e Windows
ns-3	Limitado	Código aberto	C++ e python	GNU/Linux, FreeBSD, Mac OS e Windows
Tossim	Limitado	Código aberto	nesC e python	Linux ou Cygwin no Windows
OMNet++	Sim	Comercial e código aberto	C++	Linux, Mac OS e Windows
Castalia	Sim	Código aberto	C++	Linux e Windows
Sinalgo	Sim	Código aberto	Java	Linux, Mac OS e Windows

**Tabela 1.3. Comparativo entre os principais simuladores/emuladores para IoT**

de diferentes tipos de redes, tendo uma IDE baseada no Eclipse, um ambiente de execução gráfica e outras funcionalidades. Existem extensões para simulação em tempo real, emulação de rede, integração de banco de dados, integração de sistemas, entre outras funções [Varga et al. 2001]. Castalia é um simulador para RSSFs e outras redes de dispositivos embarcados de baixa potência. Ele é baseado na plataforma do OMNeT++ e pode ser usado para pesquisas e desenvolvimento que requerem testar algoritmos distribuídos e/ou protocolos em modelos realistas de canais sem fio e rádio [Boulis et al. 2011].

**Sinalgo:** é um *framework* para avaliar algoritmos em rede (Sinalgo (**S**imulator for **N**etwork **A**lgorithms)), abstraindo a pilha de protocolos de comunicação entre os elementos computacionais. Assim, o Sinalgo foca no comportamento de algoritmos em rede. Apesar de ter sido desenvolvido para simulação de redes sem fio, pode ser usado para redes com fio. O Sinalgo utiliza a linguagem JAVA, o que torna o desenvolvimento mais fácil e rápido, além de facilitar o processo de depuração<sup>31</sup>.

### 1.3.8.3. Testbeds

*Testbed* é uma plataforma para implantar aplicações em um contexto real, ou seja, utilizando hardware real em larga escala, apropriada para a gestão de experimentação. Atualmente, existem vários *testbeds* que permitem a experimentação mais rápida. A lista, a seguir, apresenta os principais *testbeds* para a experimentação em IoT.

**WHY-NET:** é um *testbed* escalável para redes sem fio móveis. Possui diferentes tecnologias sem fio como Redes de Sensores e Antenas inteligentes [Patel and Rutvij H. 2015].

**ORBIT:** consiste de 400 nós de rádio fixos. Cada nó físico está logicamente ligado a um nó virtual em uma rede. Os nós de rádio possuem duas interfaces: IEEE 802.11x e Bluetooth. As medições podem ser realizados no nível físico, MAC e rede [Patel and Rutvij H. 2015].

<sup>31</sup><http://dcg.ethz.ch/projects/sinalgo/>

**MiNT:** neste *testbed*, o nó de rádio IEEE 802.11 é conectado a cada robô de controle remoto. Para evitar fontes de ruído, o *testbed* é configurado em uma única sala de laboratório. MiNT suporta reconfiguração de topologia e mobilidade irrestrita do nó [Patel and Rutvij H. 2015].

**IoT-LAB:** oferece uma infraestrutura de grande escala adequada para testar pequenos dispositivos sensores sem fios e comunicação de objetos heterogêneos. Também oferece ferramentas Web para desenvolvimento de aplicações, juntamente com o acesso de linha de comando direto à plataforma. *Firmwares* de nós sensores podem ser construídas a partir da fonte e implantado em nós reservados. A atividade de aplicação pode ser controlada e monitorada, o consumo de energia e interferência de rádio podem ser medidos usando as ferramentas fornecidas<sup>32</sup>.

**Indriya:** é um *testbed* de rede de sensores sem fio, que possui 127 motes TelosB. Mais de 50% dos motes são equipados com diferentes módulos de sensores, incluindo infravermelho passivo (PIR), magnetômetro e acelerômetro. Indriya usa o software de interface do usuário do Motelab, que fornece acesso baseado na Web para os nós do *testbed*, que está localizado na Universidade Nacional de Singapura [Doddavenkatappa et al. 2012].

### 1.3.9. Gateway

Na IoT, é comum que os dispositivos apresentem tecnologias de comunicação heterogêneas, por exemplo BLE, ZigBee, e outros. Para conectar esses dispositivos à Internet, é preciso que um elemento de rede realize a tradução entre os diversas tecnologias utilizadas, este elemento é chamado de *gateway*. Na Figura 1.11 são apresentadas duas visões possíveis do *gateway*. Na parte superior da figura, o *gateway* realiza a tradução de tecnologias distintas e o encaminhamento de mensagens. Neste caso, o *gateway* respeita o princípio fim-a-fim, porém a complexidade de hardware/software e gerenciamento aumentam. Por exemplo, o *gateway* precisa implementar todas as interfaces de comunicação da sub-rede IoT, bem como a interface que o conecta à Internet. Além disso, é preciso um software para controlar e gerenciar as regras de operação da rede.

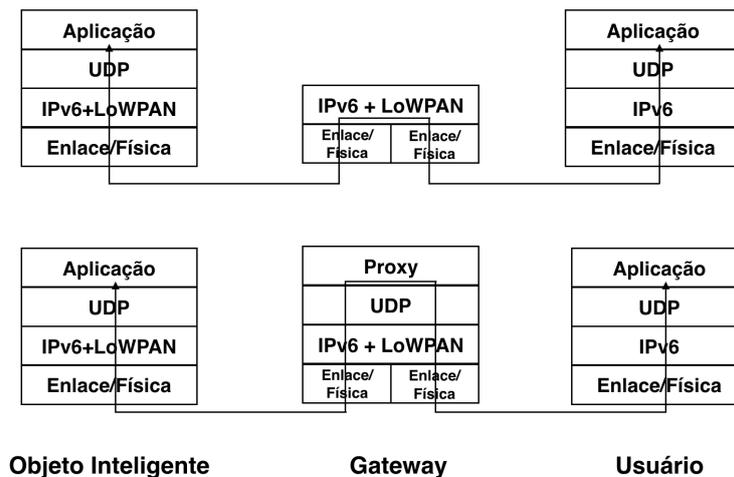
O *gateway* também pode ser visto como um prestador de serviços da rede. Um exemplo pode ser identificado na parte inferior da Figura 1.11. Nesse caso, o *gateway* funciona como um *proxy*, realizando compressão transparente para que aplicações que utilizem protocolo IP não necessitem de modificações. Um local típico para alocação de um *proxy* seria no *gateway*, ou em um servidor proxy local [Shelby and Bormann 2011].

### 1.3.10. Segurança

Para que um sistema IoT seja seguro é preciso estabelecer quais são os objetivos de segurança desejáveis. Existem pelo menos três grupos de objetivos desejáveis para segurança em IoT [Shelby and Bormann 2011]: (i) *confidencialidade* – requisito onde os dados transmitidos podem ser “escutados” e entendidos por elementos participantes da comunicação, isto é, elementos sem autorização sabem que ocorreu comunicação, mas não sabem o conteúdo da comunicação; (ii) *integridade* – os dados não podem ser alterados por elementos da rede sem devida autorização. É comum que *hackers* adulterem mensagens sem deixar vestígios e a quebra da integridade passe despercebida. De modo

---

<sup>32</sup><https://www.iot-lab.info>



**Figura 1.11. Pilha de protocolos de um gateway: Comunicação fim-a-fim (superior); Comunicação através de um proxy (inferior)**

geral, implementa-se integridade criptografando as mensagens e verificando-as no lado do receptor; (iii) *disponibilidade* – deseja-se manter o sistema sempre disponível e seguros contra ataques maliciosos. Entretanto, as redes sem fio estão sujeitas a interferências de comunicação e “hackers” podem agir nesta vulnerabilidade. Assim, o sistema IoT deve ser capaz de identificar e tratar problemas como este para evitar ataques *Denial of Service (DoS)*.

O modelo de ameaças (*threat model*) da IoT (6LoWPAN) é semelhante ao utilizado nos protocolos da Internet<sup>33</sup>. Assume-se que o “hacker” possui controle sobre a rede podendo ler, alterar ou remover qualquer mensagem na rede. Portanto, sem o suporte à criptografia torna-se inviável proteger ou detectar adulterações indevidas no sistema. O suporte à segurança pode ser implementado em diferentes camadas da pilha de protocolos. Por exemplo, na camada de enlace pode-se aplicar o algoritmo *Advanced Encryption Standard (AES)* em conjunto com *Counter with CBC-MAC (CCM)*<sup>34</sup> para manter confidencialidade a cada salto na rota entre os comunicantes. Entretanto, esta técnica não oferece qualquer segurança sobre a integridade dos dados. Por outro lado, na camada de rede pode-se empregar o IPsec<sup>35</sup> para alcançar integridade. No entanto, o padrão IPsec é considerado “pesado” para as restrições dos dispositivos IoT e, assim, é preciso adaptá-lo. Vale mencionar que os requisitos de segurança para IoT variam de aplicação para aplicação e, assim, devem considerar um ou mais dos objetivos de segurança acima mencionados ao implementar uma aplicação.

### 1.3.11. Desafios e questões de pesquisa

A Internet das Coisas apresenta vários desafios de implementação, como os discutidos acima. Esses desafios já levaram e continuam a levar à investigação de várias

<sup>33</sup>O RFC 3552 apresenta boas práticas e discussões acerca de segurança em IoT: <https://tools.ietf.org/html/rfc3552>

<sup>34</sup>RFC 3610 <https://www.ietf.org/rfc/rfc3610.txt>

<sup>35</sup>RFC 4301: <https://tools.ietf.org/html/rfc4301>

questões de pesquisa decorrentes das restrições dos dispositivos existentes na IoT, dos protocolos e soluções de interconexão desses dispositivos e da escalabilidade da rede. Além disso, à medida que a Internet das Coisas se tornar cada vez mais presente na sociedade, o projeto de aplicações e serviços, que estão sendo propostos para os diversos segmentos das atividades humana, trará também novas questões de pesquisa relacionadas principalmente ao tratamento de dados coletados por esses dispositivos. Em outras palavras, essa é uma área extremamente fértil para explorar novas questões de pesquisa que têm o potencial de impactar o estado-da-arte.

## 1.4. IoT na prática

As seções anteriores trouxeram uma visão geral sobre as bases da IoT. Foram discutidas diversas características dos objetos inteligentes permeando particularidades teóricas e artefatos existentes já empregados na IoT. Já esta seção traz uma perspectiva prática da IoT. Diante do que já foi discutido, o leitor está apto a por em prática os conceitos vistos. Os exercícios práticos visam consolidar e associar os conceitos teóricos e artefatos previamente discutidos. Além disso, uma das práticas servirá de âncora para assuntos das próximas seções, vinculando as redes de objetos inteligentes, até aqui apresentadas, com os desafios e próximos passos em relação ao futuro da IoT.

Os exemplos apresentados, a seguir, foram extraídos do conjunto de exemplos do sistema operacional Contiki versão 3.0. Presume-se que o leitor já tenha o Contiki instalado e operacional<sup>36</sup>. Todos os exemplos são de código livre e hospedados no repositório oficial do Contiki. Inicialmente será exemplificado como conectar os objetos inteligentes utilizando IPv6<sup>37</sup> e, em seguida, será pleiteado o Erbium que é uma implementação do CoAP<sup>38</sup> para redes de objetos de baixa potência no Contiki.

Os experimentos apresentados visam atender o maior público possível. Para isto, ao longo do texto a prática é exemplificada através do uso de simulador. Entretanto, o minicurso também apresenta uma página Web<sup>39</sup> onde podem ser encontrados materiais extra preparados pelos autores. Nesse endereço, encontram-se vídeos tutoriais, textos, referências e outros conteúdos relacionados.

### 1.4.1. Rede de objetos inteligentes IPv6

No primeiro experimento prático, será criada uma rede IPv6 de objetos inteligentes utilizando Cooja (veja a Seção 1.3.8). O Contiki oferece uma implementação do 6LoWPAN em conjunto com o protocolo de roteamento RPL [Hui 2012]. Além disso, o SO também oferece suporte à pilha de protocolos  $\mu$ IP TCP/IP (veja Seção 1.3.3). Para começar, inicie o Cooja através do atalho da área de trabalho ou execute o comando abaixo e, em seguida, crie uma nova simulação:

---

<sup>36</sup><http://www.contiki-os.org/start.html>

<sup>37</sup><https://github.com/contiki-os/contiki/tree/master/examples/ipv6/rpl-border-router>

<sup>38</sup><https://github.com/contiki-os/contiki/tree/master/examples/er-rest-example>

<sup>39</sup><http://homepages.dcc.ufmg.br/~bruno.ps/iot-tp-sbrc-2016/>

**Inicie o Cooja executando os comandos abaixo:**

```
$ cd <DIR>+contiki/tools/cooja/  
$ ant run
```

Dando seguimento à prática, dispositivos *Tmote Sky* serão emulados. Um dos *motes* servirá como roteador de borda da rede de objetos IPv6. O roteador de borda é o dispositivo responsável por configurar um prefixo de rede e iniciar a construção da árvore de roteamento do RPL. Em outras palavras, o roteador de borda nada mais é que a raiz da árvore de roteamento e interlocutor entre a rede de objetos e a rede externa.

**O código do roteador de borda está localizado em:**

```
<DIR>+contiki/examples/ipv6/rpl-border-router/border-router.c
```

Com o Cooja aberto, vá até a aba de criação de *mote* e adicione um *Sky mote*. Na tela seguinte, compile e carregue, como *firmeware*, o código do roteador de borda. Finalmente adicione **1** *mote* deste tipo.

Após configurar o roteador de borda, a próxima etapa é povoar a rede com objetos inteligentes. O código *sky-websense.c* ajudará nesta fase.

**O código do *sky-websense.c* está localizado em:**

```
<DIR>+contiki/examples/ipv6/sky-websense/sky-websense.c
```

Este código é uma aplicação que produz “dados sensorizados” e prover acesso a estas informações via *webservice*. Adicione alguns<sup>40</sup> *motes* desse tipo. É recomendável que o leitor investigue o código *sky-websense.c* para entender o que ele faz. Retorne para o Cooja. Na aba chamada “*Network*”, localize o roteador de borda e no seu menu de contexto selecione a opção mostrada abaixo. O Cooja informará que o roteador de borda criou um *socket* e está escutando na porta local 60001. Em seguida inicialize a simulação.

**No Menu-Contexto do Roteador de Borda selecione:**

```
"Mote tools for sky/Serial socket (SERVER) "
```

Abra um novo terminal e execute os seguintes comandos:

**Comandos para executar o programa *tunslip6***

```
$ cd <DIR>+contiki/examples/ipv6/rpl-border-router/  
$ make connect-router-cooja TARGET=sky
```

Estes comandos acabam por executar o programa *tunslip6*. O programa configura uma interface na pilha de protocolos do Linux, em seguida, conecta a interface ao *socket* em que o roteador de borda está escutando. O *tunslip6* fará com que todo o tráfego endereçado ao prefixo **aaaa**:<sup>41</sup> seja direcionado para a interface do Cooja.

<sup>40</sup> Adicione 2 ou 5 *motes* para manter a carga de processamento e consumo de memória baixos.

<sup>41</sup> Vale ressaltar que os endereços aqui apresentados serão expressos em modo comprimido. Por exemplo, `aaaa : 0000 : 0000 : 0000 : 0212 : 7401 : 0001 : 0101` é o mesmo que `aaaa :: 212 : 7401 : 1 : 101`

```

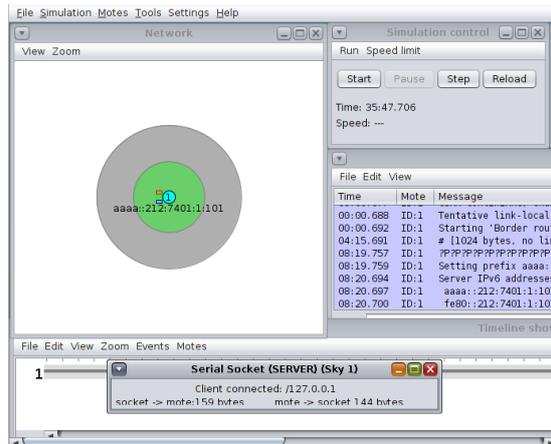
Terminal 2 - tunslip6

ifconfig tun0 inet 'hostname' up
ifconfig tun0 add aaaa::1/64
ifconfig tun0 add fe80::0:0:0:1/64
ifconfig tun0

tun0 Link encap:UNSPEC HWaddr 00-00...
inet addr:127.0.1.1 P-t-P:127.0.1.1
Mask:255.255.255.255
inet6 addr: fe80::1/64 Scope:Link
inet6 addr: aaaa::1/64 Scope:Global
...

Address:aaaa::1 => aaaa:0000:0000:0000
Got configuration message of type P
Setting prefix aaaa::
Server IPv6 addresses:
aaaa::212:7401:1:101
fe80::212:7401:1:101

```



O `tunslip6` apresentará uma saída semelhante a mostrada na caixa de título Terminal 2 e o Cooja apresentará algo como mostrado na figura ao lado<sup>42</sup>. Agora já é possível verificar se os *Tmotes Sky* emulados estão acessíveis através de ferramentas como o `ping6`.

```

Realize testes com os seguintes comandos:

$ping6 aaaa::212:7401:1:101 (Roteador de borda)
$ping6 aaaa::212:7402:2:202 (Tmote rodando sky-websense)

```

Em seu navegador, acesse o endereço do roteador de borda `http://[aaaa::212:7401:1:101]/`

A rede de exemplo possui três *motes* e apresenta topologia exibida na figura abaixo, em que `~:101` é o roteador de borda.



```

O Roteador de Borda responderá com:

Neighbors

fe80::212:7402:2:202

Routes

aaaa::212:7402:2:202/128 via fe80::212:7402:2:202 16711412s
aaaa::212:7403:3:303/128 via fe80::212:7402:2:202 16711418s

```

A resposta à requisição feita ao roteador de borda conterá duas partes. A primeira exibe a tabela de vizinhança, ou seja, os nós diretamente ligados na árvore de roteamento do RPL (*Neighbor Table*). A segunda lista os nós alcançáveis (*Routes*) e o próximo salto na rota até aquele destinatário.

Agora acesse, pelo navegador, os recursos (luminosidade e temperatura) providos pelos *Tmotes* rodado *sky-websense* como mostrado a seguir:

```

Acesse os Tmotes pelo browser com:

http://[IPv6 do Tmote]/
http://[IPv6 do Tmote]/1
http://[IPv6 do Tmote]/t

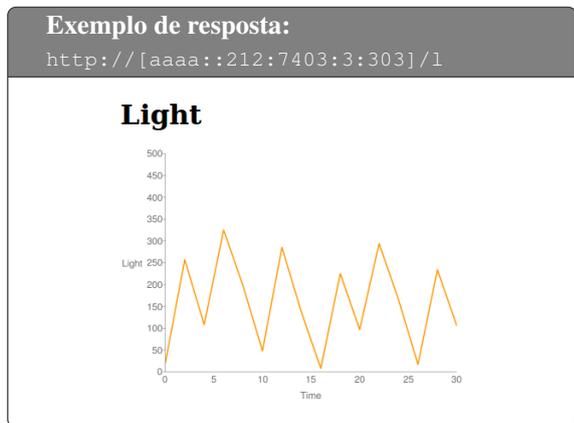
```

```

Exemplo de requisição:

http://[aaaa::212:7403:3:303]/1

```



<sup>42</sup>Note que os *motes* executando *websense* não foram exibidos.

## 1.4.2. Erbium (Er) REST: Uma implementação CoAP no Contiki-OS

Esta prática abordará o uso de *Representational State Transfer* (REST) – Transferência de Estado Representacional. Para tanto, será utilizado o Erbium (Er), uma implementação do IETF CoAP de RTF 7252 (veja a Seção 1.3.7). O Er foi projetado para operar em dispositivos de baixa potência [Kovatsch et al. 2011] e tem código livre disponível junto com o sistema operacional Contiki. Para iniciar será feita uma breve revisão da implementação e uso do CoAP no Contiki.

### 1.4.2.1. CoAP API no Contiki

No CoAP, os serviços disponibilizados pelo servidor são vistos como recursos, os quais são identificados por URIs únicas. O CoAP oferece diferentes métodos para realizar operações básicas CRUD sendo eles: **POST** para criar um recurso; **GET** para recuperar um recurso; **PUT** para atualizar algum recurso e; **DELETE** para apagar um recurso.

A implementação do CoAP no Contiki está localizada no diretório:

```
<DIR>+contiki/apps/er-coap<version>
```

Para cada recurso disponibilizado no servidor usando CoAP existe uma função (*handle function*), a qual a aplicação REST chama sempre que ocorre uma requisição de um cliente. Com a *handlefunction*, o servidor é capaz de tratar cada requisição e responder adequadamente com o conteúdo do recurso solicitado.

As macros<sup>43</sup> a seguir são providas pela implementação do CoAP/Erbium do Contiki para facilitar a criação de novos recursos para o servidor:

**Normal Resource:** este tipo de recurso serve de base para todos as demais macros. O *Normal Resource* associa uma URI a uma *handle function*.

```
1 #define RESOURCE(name, attributes, get_handler, post_handler, put_handler, delete_handler)
```

**Parent Resource:** destinado a gerenciar diversos sub-recursos de uma URI. Por exemplo, a URI `test/parent/<sub-recursos>`.

```
1 #define PARENT_RESOURCE(name, attributes, get_handler, post_handler, put_handler, delete_handler)
```

**Separate Resource:** esta macro é bastante utilizada quando é necessário enviar informações em partes. Por exemplo, quando se tem algum arquivo na memória do dispositivo. Deste modo, o arquivo pode ser enviado em partes separadas para o cliente que o solicitou.

```
1 #define SEPARATE_RESOURCE(name, attributes, get_handler, post_handler, put_handler, delete_handler, resume_handler)
```

**Event Resource e Periodic Resource:** no primeiro, a ideia é que quando um evento ocorra o dispositivo envie uma mensagem para algum cliente que esteja “observando” aquele recurso, por exemplo, quando um botão no dispositivo é pressionado envia-se uma

<sup>43</sup>Mais detalhes sobre as macros, atributos e estruturas são encontrados em: <https://github.com/contiki-os/contiki/tree/master/apps/er-coap>

mensagem para o cliente. No segundo, existe uma periodicidade no envio das mensagens, para isto um parâmetro extra indica o período. Vale pontuar que os dois recursos são *observáveis*, isto é, um cliente ao “assinar” o *feed* daquele recurso receberá notificações sempre que ocorrer mudanças naquele recurso.

```
1 #define EVENT_RESOURCE(name, attributes, get_handler, post_handler, put_handler,
    delete_handler, event_handler)

1 #define PERIODIC_RESOURCE(name, attributes, get_handler, post_handler, put_handler,
    delete_handler, period, periodic_handler)
```

Para exemplificar a implementação de um recurso, será tomado como modelo o recurso *helloworld* do arquivo *er-example-server.c* do conjunto de exemplo do Er. Abaixo é exibido um fragmento do arquivo e alguns comentários traduzidos.

```
1 /*
2  * Assinatura do metodo: nome do recurso, metodo que o recurso manipula e URI.
3  */
4 RESOURCE(helloworld, METHOD_GET, "hello", "title=\"Hello world ?len=0..\";rt=\"Text\"");
5
6 /*
7  * Handler function [nome do recurso]_handle (Deve ser implementado para cada recurso)
8  * Um ponteiro para buffer, no qual a conteudo (payload) da resposta sera anexado.
9  * Recursos simples podem ignorar os parametros preferred_size e offset, mas devem
10 * respeitar REST_MAX_CHUNK_SIZE (limite do buffer).
11 */
12 void helloworld_handler(void* request, void* response, uint8_t *buffer, uint16_t
    preferred_size, int32_t *offset) {
13     const char *len = NULL;
14     char const * const message = "Hello World!";
15     int length = 12; /* |<----->| */
16
17     /* A URI solicitada pode ser recuperada usando rest_get_query() ou usando um parser
18     que retorna chave-valor. */
19     if (REST.get_query_variable(request, "len", &len)) {
20         length = atoi(len);
21         if (length < 0) length = 0;
22         if (length > REST_MAX_CHUNK_SIZE) length = REST_MAX_CHUNK_SIZE;
23         memcpy(buffer, message, length);
24     } else {
25         memcpy(buffer, message, length);
26     }
27
28     REST.set_header_content_type(response, REST.type.TEXT_PLAIN);
29     REST.set_header_etag(response, (uint8_t *) &length, 1);
30     REST.set_response_payload(response, buffer, length);
31 }
32 /* Inicializa a REST engine. */
33 rest_init_engine();
34
35 /* Habilita o recurso. */
36 rest_activate_resource(&helloworld);
```

- Na linha 4 é declarado um *Normal Resource*, indicando o nome do recurso, bem como o método que o recurso aceita (pode aceitar mais de um método), seguidos da URI e de um texto de descrição.
- Na linha 12 é declarada a função que manipula as requisições para a URI do recurso. O padrão `[nome do recurso]_handler` deve ser mantido. Ao ser invocada, a função envia uma mensagem “*Hello World*” para o cliente. Além disso, se o parâmetro “*len*” for passado e o valor for menor que o comprimento da *string*

“Hello World”, então a função retorna somente os caracteres `[0:len]`. Se o parâmetro contiver valor 0, então a função retorna uma *string* vazia.

- Entre as linhas 18 e 25 o processamento da requisição é realizado e o *buffer* de resposta é preenchido adequadamente.
- Nas linhas 27 e 29 o cabeçalho da mensagem de resposta é preenchido indicando respectivamente o tipo da mensagem (`TEXT_PLAIN`) e o comprimento da mensagem. Finalmente na linha 31 a carga da mensagem é preenchida.
- Uma vez que o recurso já foi declarado e implementado é preciso inicializar o *framework* REST e iniciar o processo CoAP, isto é realizado na linha 33. Além disso, é preciso habilitar o recurso para que ele esteja disponível para o acesso via URI, isto é feito na linha 36.

Este é um esboço da implementação de um recurso. É recomendável a leitura dos arquivos citados, bem como o material extra do minicurso para completo entendimento.

#### 1.4.2.2. CoAP Erbium Contiki

Nesta etapa será apresentado o uso do Erbium Contiki.

Mude para o seguinte diretório:

```
<DIR>+/contiki/examples/er-rest-example/
```

Neste diretório existe uma conjunto de arquivos de exemplo do uso do Erbium<sup>44</sup>. Por exemplo, o arquivo *er-example-server.c* mostra como desenvolver aplicações REST do lado servidor. Já *er-example-client.c* mostra como desenvolver um cliente que consulta um determinado recurso do servidor a cada 10s. Antes de iniciar a prática é conveniente realizar algumas configurações. A primeira delas diz respeito aos endereços que serão utilizados. Deste modo, realize as operações abaixo:

Defina os endereços dos *Tmotes* no arquivo `/etc/hosts`

```
Adicione os seguintes mapeamentos:  
aaaa::0212:7401:0001:0101 cooja1  
aaaa::0212:7402:0002:0202 cooja2  
...
```

Além disso, adicione a extensão Copper (CU)<sup>45</sup> CoAP *user-agent* no Mozilla Firefox.

No arquivo *er-example-server.c* verifique se as macros “REST\_RES\_[HELLO e TOGGLE]” possuem valor 1 e as demais macros em 0. Em caso negativo, modifique de acordo. Agora as configurações preliminares estão prontas.

<sup>44</sup>Para mais detalhes sobre os arquivos consulte: <https://github.com/contiki-os/contiki/tree/master/examples/er-rest-example>

<sup>45</sup><https://addons.mozilla.org/en-US/firefox/addon/copper-270430>

Na pasta do exemplo Erbium Rest execute o comando abaixo:

```
make TARGET=cooja server-only.csc
```

Este comando iniciará uma simulação previamente salva. Esta simulação consta 2 dispositivos *Tmotes*, o dispositivo de ID 1 é um roteador de borda e o ID 2 emula um dispositivo executando *er-example-server.c* como *firmeware*.

Em um novo terminal execute o comando abaixo:

```
make connect-router-cooja
```

Como na primeira prática (Seção 1.4.1), este comando executará o programa `tunslip6` e realizará o mesmo procedimento anteriormente citado. Inicie a simulação, abra o Mozilla Firefox e digite: `coap://cooja2:5683/`<sup>46</sup>.

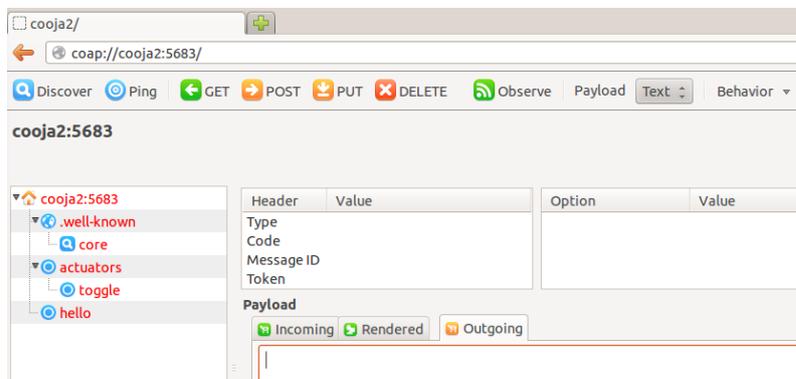


Figura 1.12. Resultado para `coap://cooja2:5683/`

pressiono o botão “GET” do ambiente Copper e observe o resultado. Já no recurso “toggle” pressione o botão “POST” e observe que o LED RED do `cooja2` (no simulador) estará ligado, repita o processo e verifique novamente o LED.

É recomendável que os leitores alterem os recursos disponíveis pelo `cooja2` no arquivo *er-example-server.c* modificando os recursos ativos no CoAP server convenientemente. Para fazer isto, comente ou descomente os “`rest_activate_resource()`” presentes no código. No material extra do curso, existem outras simulações e exemplos de uso. Vale ressaltar, que o mote emulado (*Tmote Sky*) apresenta limitações de memória, como a maioria, dos objetos inteligentes e, por esse motivo, nem sempre todos os recursos poderão estar ativos ao mesmo tempo. Em caso de excesso de memória, o simulador ou compilador para o dispositivo alertará tal problema.

**Comentários.** O primeiro exercício utiliza na prática os conceitos aprendidos na seções anteriores. Mostrou-se como funciona uma rede de objetos inteligentes utilizando os protocolos que representam o estado-da-arte para endereçar dispositivos (6LoWPAN) e rotear mensagens (RPL) através de implementações disponíveis no Contiki. A segunda prática mostra como acessar, de modo padronizado, os recursos dos objetos inteligentes por meio

<sup>46</sup>É importante frisar que o CoAP utiliza a porta 5683 como padrão.

Como resultado o *Mozilla Firefox* deverá abrir o ambiente do Copper. A Figura 1.12 exemplifica a situação atual. No lado esquerdo é possível verificar os recursos disponíveis pelo servidor (`cooja2`). Para experimentar os recursos providos pelo `cooja2`, selecione o recurso “hello”. Note que a URI foi alterada, em seguida,

do protocolo CoAP, o qual emprega REST e URI para identificar unicamente os recursos disponíveis nos objetos inteligentes. No conteúdo disponível na Web do capítulo<sup>47</sup> existem exemplos para implementação em dispositivos reais.

O conteúdo teórico e prático visto até o momento elucidaram as bases que sustentam o funcionamento da IoT hoje. Os conceitos e práticas são importantes para melhor compreender as próximas seções, pois será assumido que existe uma rede de dispositivos inteligentes funcional e que os recursos providos pelos dispositivos possam ser acessados utilizando, por exemplo, o CoAP ou similares.

## 1.5. Gerenciamento e Análise de Dados

Uma das principais características da IoT diz respeito à sua capacidade de proporcionar conhecimento sobre o mundo físico, a partir da grande quantidade de dados coletados pelos seus sensores. Por meio da mineração destes dados, é possível descobrir padrões comportamentais do ambiente ou usuários e realizar inferências eles. Por exemplo, é possível concluir, a partir dos dados obtidos, sobre fenômenos naturais, de modo a permitir que aplicações possam antecipar condições meteorológicas e tomar decisões com base nisso. Obviamente, os maiores beneficiados com isto são os próprios usuários, que terão melhorias na qualidade de suas vidas.

Contudo, para se extrair todo o potencial contido nos dados da IoT, é necessário que, primeiro, algumas medidas sejam tomadas. Nesta seção, destacamos as principais características e desafios encontrados ao se lidar com dados oriundos de sensores. Além disso, apresentamos algumas das principais técnicas utilizadas para modelagem e processamento destes dados, até a extração de conhecimento, para melhoria da qualidade dos serviços em cenários nos quais a IoT é empregada. Por fim, apontamos possíveis direcionamentos para aqueles que desejarem se aprofundar mais no assunto.

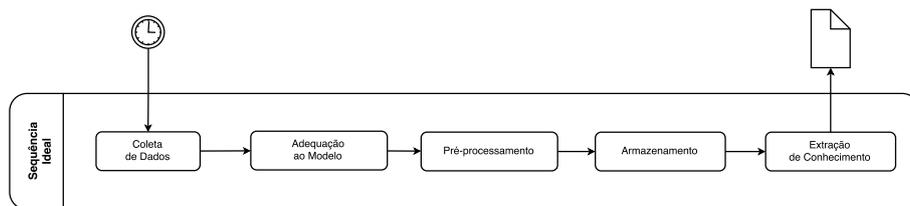
### 1.5.1. Descrição do problema

Do ponto de vista dos usuários e suas aplicações, a “*raison d’être*” (razão de ser) da IoT é, justamente, a extração de conhecimento a partir dos dados coletados pelos seus sensores. Extrair um conhecimento refere-se a modelar e analisar dados definindo uma semântica de forma a tomar decisões adequadas para prover um determinado serviço [Barnaghi et al. 2012]. Tomando como exemplo o cenário de *smart grids* [Yan et al. 2013], uma arquitetura de IoT pode auxiliar a controlar e melhorar o serviço de consumo de energia em casas e edifícios. Por meio da IoT, as fornecedoras de energia podem controlar os recursos proporcionalmente ao consumo e possíveis falhas na rede elétrica. Isso acontece por meio das diversas leituras que são coletadas por objetos inteligentes e são analisadas para prevenção e recuperação de falhas, aumentando, assim, a eficiência e qualidade dos serviços.

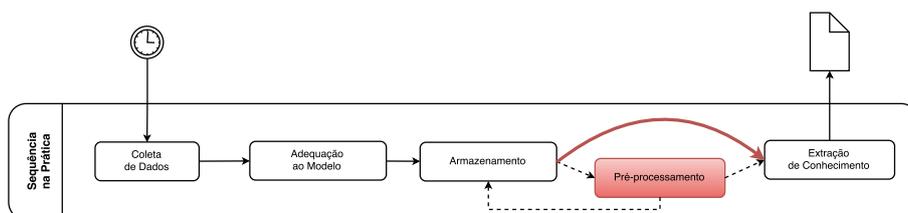
Para melhor entender o processo de extração de conhecimento, na Figura 1.13a são apresentadas as etapas ideais, que vão desde a coleta dos dados brutos até a extração de conhecimento a partir deles. As etapas de adequação dos dados a um modelo, de pré-processamento e armazenamento são essenciais para que eles estejam aptos a serem

---

<sup>47</sup><http://homepages.dcc.ufmg.br/~bruno.ps/iot-tp-sbrc-2016/>



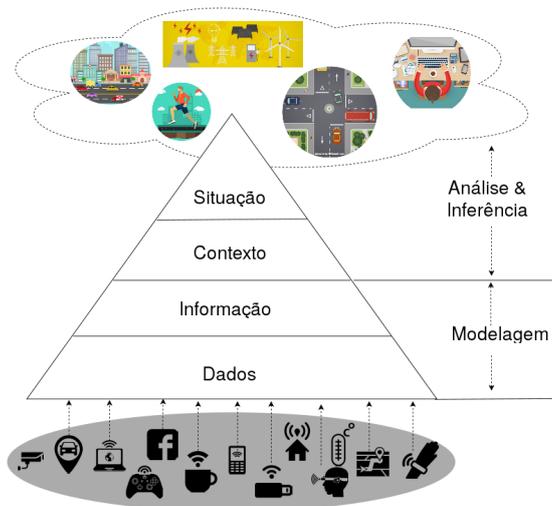
(a) Representação da sequência ideal



(b) Representação da sequência na prática

**Figura 1.13. Etapas para extração de conhecimento a partir de dados de sensores**

processados e para que técnicas de inferências possam ser aplicadas sobre eles.



**Figura 1.14. Hierarquia dos níveis de conhecimento a partir de dados brutos de sensores**

Do ponto de vista do conhecimento em si, uma outra abordagem que pode-se aplicar sobre este processo está ilustrada na Figura 1.14. Nela, a transformação da informação a partir de dados brutos de sensores pode ser entendida por meio de uma hierarquia de níveis de conhecimento. Estes níveis podem ser sub-divididos em dois momentos: (i) modelagem, e (ii) análise e inferência. Na modelagem, cujo principal objetivo é o de adicionar semântica aos dados, depara-se com um grande volume de dados oriundos de diversos tipos de sensores. Uma particularidade desafiadora para manipular esses dados é o fato de serem originados de múltiplas fontes e, em muitos casos, heterogêneas. Nesse sentido, algumas técnicas de pré-processamento, como fusão e representação de dados,

podem ser adotadas, após isso, os dados são armazenados em uma representação adequada. O segundo momento consiste em interpretar tais dados visando obter contexto a partir deles e, com isso, realizar inferências para se extrair conhecimento quanto à situação de um determinado aspecto, seja ele um fenômeno natural ou estado de uma entidade.

Contudo, apesar de cada uma destas etapas ser de fundamental importância para o processo de extração de conhecimento como um todo, na prática não é bem isso o que acontece. Como ilustrado na Figura 1.13b, o que geralmente acontece é a ausência da etapa de pré-processamento dos dados antes que eles sejam armazenados. Os dados coletados dos sensores são simplesmente armazenados para posterior utilização, o que pode comprometer todas as inferências subsequentes. Assim, uma vez de posse dos dados armazenados, o que podemos fazer é realizar as atividades de pré-processamento em uma etapa adicional, antes que os dados sejam utilizados para a extração de conhecimento.

Considerando o cenário representado pelo que ocorre na prática, no restante desta seção aprofundamos nossas considerações sobre cada uma destas etapas.

### 1.5.2. Modelagem de dados

Dados brutos obtidos pelos sensores dificilmente possuem explicitamente uma organização hierárquica, relacionamentos ou mesmo um formato padrão para manipulação. Esta etapa de modelagem refere-se em definir uma representação para manipular e trabalhar com esses dados visando uma interoperabilidade e formatos padrões interpretáveis. Nesse sentido, aplica-se a modelagem que consiste em definir um conjunto de fatores tais como atributos, características e relações do conjunto de dados sensorizados. Tais fatores variam de acordo com o domínio da aplicação e, conseqüentemente, uma determinada solução de modelagem se torna mais adequada que outra. A modelagem aqui empregada consiste em representações conceituais de como representar a informação. As representações apresentadas são: *key-value*, *markup scheme*, *graphical*, *object based*, *logic based* e *ontology based modeling*. A aplicabilidade dessas representações pode variar de acordo com o domínio da aplicação. Portanto, cada representação é descrita abaixo considerando suas vantagens e desvantagens em uma perspectiva geral. Um estudo mais aprofundado pode ser encontrado em [Bettini et al. 2010].

**Key-value based:** nesta representação os dados são modelados como um conjunto de chaves e valores em arquivos de texto. Apesar dessa ser a forma mais simples de representação da informação entre as apresentadas aqui, ela possui muitas desvantagens como a complexidade de organizar e recuperar quando o volume de dados aumenta, além da dificuldade de realizar relacionamentos entre os dados.

**Markup scheme based:** um *markup scheme* utiliza *tags* para modelar os dados. Linguagens de marcação (e.g., XML<sup>48</sup>) e mecanismos de troca de dados (e.g., JSON<sup>49</sup>) podem ser utilizados para este fim e são bastante aplicados para armazenamento e transferência de dados. A vantagem dessa técnica consiste na estruturação hierárquica dos dados e acesso aos dados utilizando as *tags*. Recentemente, o W3C adotou o EXI<sup>50</sup> o qual consiste de uma representação compacta do XML. EXI pode ser uma relevante alternativa ao XML

---

<sup>48</sup><https://www.w3.org/XML/>

<sup>49</sup><https://tools.ietf.org/html/rfc4627>

<sup>50</sup><https://www.w3.org/TR/exi/>

para IoT, pois é adequado para aplicações com recursos computacionais limitados. A SensorML<sup>51</sup> (*Sensor Model Language*) provê uma especificação exclusiva para sensores considerando diversos aspectos como localização e metadados.

**Object based:** esta técnica permite a construção de uma modelagem considerando o relacionamento e a hierarquia entre os dados. Um *Markup scheme* apresenta limitações no sentido que as *tags* são palavras chaves de um domínio e não fornecem uma semântica para a interpretação pela máquina. Técnicas de modelagem como UML (*Unified Modeling Language*) e ORM (*Object Role Modelling*) são preferíveis à *Markup scheme*, pois permitem capturar relacionamentos em um contexto. Esse tipo de modelagem pode ser facilmente vinculada a uma linguagem de propósito geral e, conseqüentemente, integrável à sistemas de inferência e cientes de contexto. No entanto, não tem a mesma predisposição para realizar inferência das representações baseadas em lógica e ontologia.

**Logic based:** neste tipo de modelagem, expressões lógicas e regras são usadas para representar a informação. A representação lógica é mais expressiva que as anteriores do ponto de vista que possibilita a geração de novas informações a partir dos dados. Dessa forma, a partir de informações de baixo nível pode-se ter regras para compor informações de alto nível. A desvantagem dessa representação é a dificuldade em generalização das regras, dificultando a reusabilidade e aplicabilidade.

**Ontology based:** nesta forma de representação, as informações são modeladas como ontologia seguindo os conceitos da *Semantic Web*. Uma ontologia define um conjunto de tipos, propriedades e relacionamentos de entidades dentro de um tema considerando aspectos espaciais e temporais [Jakus et al. 2013]. Para a área de sensores e IoT, surgiu a *Sensor Semantic Web* que refere-se a aplicar o conhecimento da *Web Semântica* contemplando o domínio de sensores. Dessa forma, tecnologias consolidadas podem ser utilizadas, tais como RDF e OWL, para modelar o conhecimento de domínio e estruturar as relações definidas na ontologia. A desvantagem da representação baseada em ontologia concentra-se no consumo de recursos computacionais.

### 1.5.3. Armazenamento

Para que a grande quantidade de dados gerados pelos sensores da IoT possa ser posteriormente analisada e processada, a etapa de armazenamento faz-se essencial. Como apresentado na Figura 1.6(III), uma das principais formas de acesso a estes dados, e a mais comumente encontrada na prática, acontece por meio de servidores de armazenamento. Muitos destes estão disponíveis sob a forma de plataformas computacionais especificamente voltadas para prover serviços para a IoT. Na Tabela 1.4 apresentamos algumas plataformas para IoT atualmente disponíveis, destacando algumas das suas principais características.

A maioria destas plataformas baseiam suas funcionalidades de acordo com os modelos de dados definidos, assim, logo após coletados, os dados quando adequados ao modelo serão armazenados de forma a possibilitar sua consulta subsequente. Porém, ao contrário do que foi discutido quanto os aspectos de modelagem mais adequados ao domínio de aplicação, o que geralmente ocorre, na prática, é a utilização de um modelo mais

---

<sup>51</sup><http://www.sensorml.com/index.html>

simples e genérico possível, que se adequa ao mais variado número de aplicações. Neste caso, os modelos que se encontram nas principais plataformas são baseados em *key-value* e *markup scheme*. Estes modelos são utilizados para que os usuários possam dar semântica aos seus dados, descrevendo coisas como os tipos dos dados, formatos, etc. Além disso, algumas outras meta informações também podem ser providas, como a localização dos sensores, uma descrição textual do que o sensor representa e algumas *tags* que poderão ser usadas como palavras-chave para consultas.

Além do armazenamento, algumas plataformas também disponibilizam outros serviços, como a marcação de tempo (*timestamp*) de todos os dados recebidos, algumas funcionalidades de processamento, que geralmente são pré-definidos e acessados sob a forma de *wizards* ou *dashboards*, definição de regras para a execução de atividades com base em eventos ou comportamento dos dados, entre outros. Para mais detalhes sobre o projeto e implementação de plataformas para IoT, ver o trabalho de [Paulo F. Pires 2015].

#### 1.5.4. Pré-processamento

Para que os dados possam ser processados adequadamente, eles devem possuir qualidade suficiente para os processos a serem empregados. Apesar de ser difícil de se conceituar, uma forma simples de entender a qualidade aqui discutida se refere aos dados que estão aptos ao uso [Bisdikian et al. 2013]. Nesse sentido, um passo fundamental para contornar possíveis problemas existentes nos dados coletados, de forma a torná-los aptos ao uso, é a de pré-processamento. Contudo, como visto na Figura 1.13b, apesar de sua importância, esta etapa de pré-processamento é muitas vezes inexistente, sendo os dados armazenados com suas imperfeições. Assim, diante do exposto, uma alternativa que se tem é a inserção de esta etapa de pré-processamento logo antes dos dados serem utilizados para a extração de conhecimento.

A seguir, serão discutidos alguns dos principais problemas que ocorrem no dados da IoT e algumas técnicas comumente utilizadas para reduzir seu impacto durante a etapa de extração de conhecimento.

##### 1.5.4.1. Principais problemas dos dados

Para melhor entendimento dos principais problemas que podem ocorrer nos dados provenientes dos sensores de IoT, [Khaleghi et al. 2013] definem uma taxonomia de classificação partindo de problemas básicos relativos aos aspectos dos dados, nos quais os principais são descritos abaixo.

**Imperfeição:** refere-se aos efeitos causados por alguma imprecisão ou incerteza nas medidas capturadas pelos sensores. As causas destes problemas podem ser várias, desde a problemas nas leituras devido a falhas de hardware ou calibragem dos sensores, até a fatores externos ao sensor, como do seu posicionamento em locais que adicionam ruídos às suas leituras.

**Inconsistência:** surge principalmente dos seguintes problemas: (i) dados fora de sequência, isto é, em que a ordem em que foram armazenados ou temporalmente demarcados difere da real ordem de ocorrência no mundo físico, (ii) presença de *outliers* nos dados,

Plataforma	Endereço	Descrição	Tipo de conta
AWS IoT	aws.amazon.com/iot	Plataforma da Amazon voltada para empresas.	Possui conta gratuita, mas pede cartão de crédito para confirmar.
Arrayent	arrayent.com	Plataforma com foco empresarial.	Não disponibiliza conta gratuita.
Axeda	axeda.com	Plataforma com foco empresarial. Provê serviços de gerenciamento e comunicação entre dispositivos.	Não disponibiliza conta gratuita.
Beebotte	beebotte.com	Plataforma com interessantes recursos, incluindo a possibilidade de criação de dispositivos públicos.	Possui conta gratuita, mas com limite de 3 meses de histórico.
BugLabs	dweet.io	Permite <i>publish-subscribe</i> para disponibilização dos dados e integração entre sensores.	Possui conta gratuita, mas os dados são apagados após 24h.
Carriots	carriots.com	Plataforma com foco empresarial. Provê serviços de gerenciamento de e comunicação entre dispositivos	Possui conta gratuita, mas com várias limitações, e.g., número de dispositivos e acessos.
Electric imp	electricimp.com	Plataforma em nuvem que integra o conjunto de soluções dos dispositivos <i>electric imp</i> .	Possui conta gratuita.
Evrythng	evrythng.com	Plataforma com foco empresarial. Permite <i>publish-subscribe</i> para disponibilização dos dados de sensores.	Disponibiliza conta gratuita para desenvolvedor.
Exosite	exosite.com	Plataforma com foco empresarial.	Possui conta gratuita, mas limitada.
Flowthings	flowthings.io	Plataforma com interessantes conceitos para a integração de sensores.	Possui conta gratuita para desenvolvedor.
IBM Bluemix	bluemix.net	Plataforma da IBM com foco empresarial.	Possui conta gratuita, mas pede cartão de crédito para confirmar.
Kaa	kaaproject.org	<i>Middleware open source</i> disponível para a criação de sua própria plataforma para IoT.	Gratuita.
Lelylan	lelylan.com	Projeto <i>open source</i> com interessantes conceitos de arquitetura que pode ser utilizado para a criação de sua própria plataforma.	Gratuita.
Linkafy	linkafy.com	Plataforma voltada para o controle de dispositivos residenciais.	Possui conta gratuita, mas limitada a apenas dispositivo.
mbed	mbed.com	Plataforma que integra o conjunto de soluções que suportam os dispositivos mbed da ARM.	Possui conta gratuita, com limitações.
Microsoft Azure IoT	microsoft.com/iot	Plataforma da Microsoft voltada a IoT com foco empresarial.	Possui conta gratuita de um mês para testes.
Open.sen.se	open.sen.se	Plataforma interessante para integração dos sensores e seus dados.	Conta apenas após requisição.
OpenSensors	opensensors.io	Plataforma robusta com o foco principal para sensores abertos. Permite <i>publish-subscribe</i> para disponibilização dos dados de sensores.	Conta gratuita disponível, paga-se apenas para ter sensores privados.
PubNub	pubnub.com	Plataforma robusta com diversas funcionalidades voltadas para IoT.	Possui conta gratuita com limitações.
SensorCloud	sensorcloud.com	Plataforma com foco empresarial.	Possui conta gratuita, mas limitada.
SensorFlare	sensorflare.com	Plataforma para integração de sensores, mas apenas suporta alguns fabricantes e modelos.	Possui conta gratuita.
Sentilo	sentilo.io	Projeto gratuito e disponível para a criação de sua própria plataforma. Voltada às arquiteturas de <i>smart cities</i> .	Gratuita.
Shiftr	shiftr.io	Interessantes conceitos para a integração de sensores de forma intuitiva.	Possui conta gratuita.
ThingPlus	thingplus.net	Plataforma sul coreana com o foco interessante sistema de definição de regras para integração entre sensores.	Possui conta gratuita, mas limitada.
ThingSquare	thingsquare.com	Plataforma voltada ao controle de dispositivos e integração via celular.	Possui conta de desenvolvedor gratuita.
ThingSpeak	thingspeak.com	Plataforma robusta, com várias funcionalidades, como sensores públicos e busca por histórico.	Conta gratuita disponível.
ThingWorx	thingworx.com	Plataforma com recursos interessantes, mas mais voltada a soluções empresariais.	Conta gratuita, mas com limitações.
Xively	xively.com	Plataforma robusta, disponibiliza várias funcionalidades como busca por sensores públicos e histórico.	Foco empresarial, com conta paga disponível e gratuita apenas via solicitação.

**Tabela 1.4. Algumas das principais plataformas para IoT**

observações que estão bem distantes das demais observações realizadas, causadas por alguma situação inesperada, e (iii) dados conflitantes, quando diferentes sensores medindo um mesmo fenômeno geram dados diferentes, agregando uma dúvida sobre qual sensor seria mais confiável.

**Discrepância:** este é um problema causado, principalmente, quando diferentes tipos de sensores são utilizados para coletar dados sobre um mesmo fenômeno. Por exemplo, sensores físicos coletando informações sobre o tráfego, comparados com câmeras de monitoramento, ou ainda, sensores sociais, que coletam informações dadas por usuários em seus aplicativos móveis [Silva et al. 2014].

Além destes problemas, também podemos destacar outros problemas dos dados, principalmente no cenário atual da IoT, onde usuários comuns também estão participando de forma colaborativa da geração destes dados [Borges Neto et al. 2015]. Devido à popularização e redução dos custos dos sistemas computacionais embarcados, muitos usuários estão criando seus próprios sensores, seguindo um modelo DIY (*Do It Yourself*). Neste cenário, eles são responsáveis pela implantação, coleta e distribuição dos dados dos sensores, geralmente tornando-os públicos através das principais plataformas de IoT. Contudo, por se tratarem de sensores “particulares”, não há nenhuma garantia quanto à qualidade dos dados gerados, nem mesmo da disponibilidade dos sensores.

Assim, alguns problemas que podem surgir neste novo cenário são: (i) ausência de descrição dos dados gerados, quando os usuários submetem os dados coletados pelos seus sensores para uma plataforma sem descrever de que se trata o dado, dificultando qualquer posterior utilização deste dado por outros usuários, (ii) disponibilidade dos sensores, quando os sensores param de funcionar, temporária ou permanentemente, sem mais detalhes se voltaram a operar ou não, geralmente de acordo com as necessidades dos próprios usuários, (iii) imprecisão das leituras causadas pelo baixo custo e qualidade dos sensores “caseiros”, geralmente utilizando-se de técnicas alternativas para medir um fenômeno, as leituras destes sensores dos usuários podem diferir em magnitude dos dados coletados por sensores mais profissionais quanto a um mesmo fenômeno.

Para exemplificar isto, a Figura 1.15 apresenta duas medições distintas para um mesmo fenômeno, a velocidade do vento, na região da Espanha, realizadas por um sensor público, disponibilizado por um usuário através da plataforma *ThingSpeak*<sup>52</sup> e pelo serviço meteorológico do *Weather Underground*<sup>53</sup>, no período entre 12 de setembro a 31 de outubro de 2015. Observa-se que embora bem relacionadas, com um coeficiente de correlação equivalente a 0.915 entre eles, suas magnitudes são diferentes. Além disso, também pode-se notar a incompletude destes dados, quando há lacunas devido à falta de dados coletados pelos sensores.

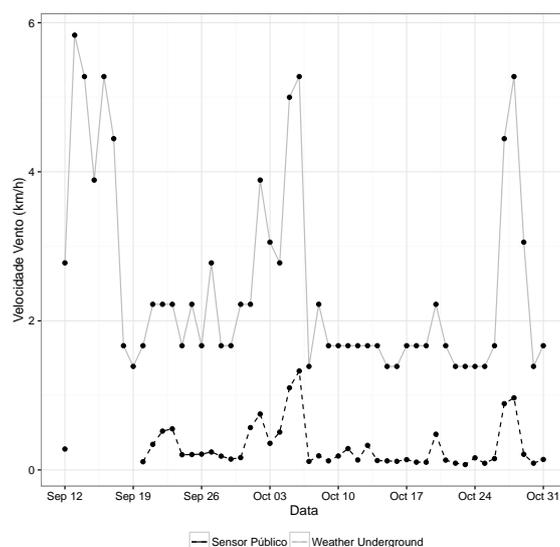
#### 1.5.4.2. Principais técnicas de pré-processamento

O pré-processamento consiste na aplicação de técnicas, em sua maioria estatísticas e demais operações matemáticas, sobre os dados com o intuito melhorar a sua qualidade,

---

<sup>52</sup><https://thingspeak.com>

<sup>53</sup><https://www.wunderground.com>



**Figura 1.15. Velocidade do Vento (km/h) coletada na região de Madrid, Espanha, medida por um sensor público, disponível na plataforma *ThingSpeak* (linha tracejada) e pelo serviço meteorológico do *Weather Underground* (linha sólida)**

contornando possíveis problemas existentes e removendo imperfeições. A complexidade desta etapa pode ser alta, principalmente neste cenário em questão, quando os dados são heterogêneos, oriundos de diversas fontes e com diferentes problemas. Nesse sentido, a decisão sobre qual técnica aplicar varia de acordo com o problema encontrado nos dados e, além disso, do que se espera fazer com estes dados. Assim, a seguir será apresentada uma visão geral sobre algumas das técnicas comumente utilizadas para alguns dos problemas citados, e apontamos algumas referências, para que leitores mais interessados possam se aprofundar no assunto.

**Imprecisões e outliers:** a presença de imprecisões e *outliers* em dados é um problema muito comum em diversas áreas e um ponto bastante estudado pela comunidade científica. As soluções mais comumente utilizadas para contornar estes problemas são baseadas em técnicas de suavização dos dados. Por exemplo, (i) a utilização de médias móveis (*moving average*), onde as amostras são suavizadas por meio da média de amostras vizinhas, e (ii) de interpolação (polinomial ou *splines*), onde são definidas funções, *e.g.*, polinomiais, que melhor se ajustam às amostras contidas nos dados. Com isto, é possível diminuir o efeito dos ruídos causados pelas imperfeições nos dados. Para mais detalhes, uma consulta pode ser [Morettin and Toloï 2006].

**Lacunas nos dados:** o caso de lacunas nos dados acontece por fatores diversos e que podem causar diferentes níveis de prejuízo em sua extração de conhecimento. Um caso mais simples seria a lacuna causada por uma falha esporádica na operação dos sensores, por razões não associadas ao fenômeno monitorado, causando uma lacuna aleatória ou MAR (*missing at random*). Este tipo de falha pode ser contornada de forma mais fácil, por exemplo, por meio de interpolação para completar os dados faltantes. Mas, dependendo da forma como isso acontece, podem ser inseridos lacunas de forma sistemáticas nos

dados, prejudicando a sua posterior análise. Por exemplo, um sensor que pára de coletar dados quando a temperatura atinge certos níveis de valores, ou quando um usuário desliga o sensor à noite quando deixa o escritório. Este tipo de lacunas que não são geradas aleatoriamente, ou MNAR (*missing not at random*) são mais problemáticas para o seu processamento. Outras técnicas também podem ser aplicadas, desde a simples remoção do período contendo lacunas até a imputação dos dados faltantes por meio da estimativa a partir dos demais dados existentes. Mais detalhes em [Schafer and Graham 2002].

**Diferença de granularidade:** devido à grande quantidade de sensores heterogêneos, um problema relevante que surge diz respeito às diferenças de amostragem que cada sensor possui. Isso pode causar diferenças significativas na granularidade dos dados de diferentes sensores. Por exemplo, para um mesmo fenômeno em um mesmo intervalo de tempo, podemos ter um sensor coletando dados a cada 5 segundos e outro a cada 1 minuto. Para que seja possível combinar os dados destes sensores, um primeiro pré-processamento seria igualar a quantidade de amostras de cada um deles. Para isto, algumas técnicas podem ser utilizadas e, uma simples mas eficaz é a PAA (*Piecewise Aggregate Approximation*), que é empregada pelo algoritmo de clusterização SAX (*Symbolic Aggregate approxImation*) [Lin et al. 2003], para a redução da dimensão do conjunto de dados por meio da agregação de dados, similar ao que é feito com médias móveis. Assim, pode-se transformar os dados de forma a possuírem a mesma dimensão. Ainda sobre a redução de dimensão, esta é uma técnica bem válida para o cenário de IoT, pois espera-se uma grande quantidade de dados sendo gerados. Outras estratégias também podem ser adotadas, como a transformação via *wavelets* ou Fourier, mais detalhes em [Rani and Sikka 2012, Warren Liao 2005].

**Combinação de diversas fontes:** para a combinação de dados de diversas fontes, como é o caso da IoT, técnicas de fusão de dados podem ser aplicadas de forma a compor uma única representação destes dados. Fusão de dados é o método de combinar dados de diversos sensores para produzir uma semântica mais precisa e muitas vezes inviável de ser obtida a partir de um único sensor. A utilização de fusão de dados nesta etapa de pré-processamento tem o intuito principal de cobrir os problemas dos dados de um sensor através dos dados coletados por outros sensores similares, gerando assim um novo dado combinado mais preciso. Dessa forma, são aplicados métodos automáticos ou semi-automáticos para transformar dados de diferentes fontes em uma representação que seja significativa para a tomada de decisão e inferência. Em cenários de IoT nos quais existem milhares de sensores a fusão de dados é uma poderosa ferramenta tanto processo de extração de conhecimento quanto para reduzir recursos computacionais semelhante ao que ocorre em redes de sensores sem fio. Várias técnicas de fusão podem ser aplicadas, como, por exemplo, filtros de Kalman [Khaleghi et al. 2013]. Outras técnicas muito utilizadas para a combinação de sensores distintos se baseiam na clusterização de dados similares, com base em alguma métrica de distância, mas mais detalhes sobre isso algumas técnicas de clusterização vide [Rani and Sikka 2012, Warren Liao 2005].

### 1.5.5. Extração de conhecimento

Como visto na Figura 1.14, a modelagem consiste em explorar os dados brutos para estruturá-los em uma específica representação. Aumentando o nível de abstração na hierarquia, contexto refere-se a qualquer informação que pode ser utilizada para caracterizar a situação de uma entidade. Sendo essa entidade um objeto, lugar ou pessoa que é con-

siderada relevante para interação entre um usuário e uma aplicação, incluindo o usuário e a própria aplicação [Dey 2001]. Enquanto que uma situação representa a interpretação semântica de contextos, geralmente derivado pela combinação de diversas informações contextuais, proporcionando conhecimento sobre o mundo físico [Dobson and Ye 2006]. Particularmente, a etapa de análise e inferência busca definir o contexto e a situação a partir dos dados coletados por sensores.

Para exemplificar um cenário, Bettini [Bettini et al. 2010] especifica uma situação “reunião está ocorrendo” considerando as seguintes informações contextuais: localização de várias pessoas e agenda de atividades delas, informação de sensores nos pisos, quais os dispositivos ativos na sala, o som ambiente e as imagens de câmeras. Ao longo do tempo essas informações contextuais vão se alterando, mas a situação ainda é a mesma. Além disso, outras informações contextuais poderão ser incorporadas, enquanto essas utilizadas podem se tornar obsoletas. Dessa forma, o objetivo da inferência refere-se a estratégia de extrair um conhecimento (i.e., semântica de uma situação) baseado nos dados coletados. Esta etapa é relacionada com a etapa de modelagem, pois algumas técnicas de modelagem são preferíveis de serem utilizadas com determinado tipo de técnica de inferência. A seguir, são apresentadas algumas categorias de técnicas úteis para inferência de situações. Uma revisão mais abrangente sobre tais técnicas pode ser encontrada em [Bettini et al. 2010, Perera et al. 2014].

**Aprendizagem Supervisionada:** Nesse tipo de técnica, uma primeira coleção de dados é coletada para compor o conjunto de treinamento. Para tanto, esse dados devem ser rotulados em classes específicas [Mitchell 1997] [Bishop 2006]. Em seguida, cria-se um modelo (ou função) que aprende a classificar dados de acordo com os dados que foram utilizados na etapa de treinamento. As árvores de decisão, redes neurais artificiais baseadas neste tipo de aprendizado e máquinas de vetores de suporte são exemplos de técnicas de aprendizagem supervisionada. Dois fatores importantes são a seleção de características significativas e uma considerável quantidade de dados para classificação.

**Aprendizagem não supervisionada:** Nesta categoria de técnicas, não existe nenhum conhecimento a priori sobre que padrões ocorrem nos dados e o objetivo é encontrar um modelo (ou função) que descubra padrões implícitos em um conjunto de dados não rotulados [Mitchell 1997] [Bishop 2006]. Dessa forma, é difícil uma confiável validação dos resultados obtidos e os resultados geralmente não são previsíveis. Exemplos clássicos desta categoria são as técnicas de clusterização tais como K-Means e clusterização hierárquica que agrupam os elementos se baseando em métricas de similaridade entre eles.

**Regras:** Este tipo de técnica consiste em definir regras condicionais. Apesar de ser a forma mais simples de inferência, ela apresenta dificuldades de generalização e pouca extensibilidade para diferentes aplicações.

**Ontologias:** Nessa categoria, ontologias podem ser utilizadas tanto na modelagem como para a inferência [Min et al. 2011]. Assim, já se tem a vantagem de modelar um conhecimento sabendo o domínio da aplicação e o mapeamento das possibilidades de inferência. No entanto, apresenta a desvantagem de não tratar ambiguidades ou resultados inesperados. Essas desvantagens podem ser contornadas fazendo a combinação com regras.

**Lógica probabilística:** Também conhecida como inferência probabilística refere-se a utilizar a teoria de probabilidade para lidar com as incertezas existentes em um processo dedutivo [Murphy 2012]. Ao contrário das ontologias, esta categoria de técnicas pode lidar com ambiguidades considerando as probabilidades associadas para realizar a inferência. A desvantagem consiste em descobrir tais probabilidades. *Hidden Markov Models* (HMM) é um exemplo clássico e tem sido aplicado em cenários de reconhecimento de atividades de pessoas.

## 1.6. Considerações Finais

No decorrer do capítulo, o leitor foi apresentado a diversos aspectos da Internet das Coisas, passando por questões tanto teóricas quanto práticas. Por ser uma área extensa, ainda existem pontos que não foram discutidos ao longo do texto e, por esse motivo, alguns desses assuntos serão brevemente referenciados aqui e no conteúdo online<sup>54</sup> como leitura complementar.

A IoT, neste momento, passa por questões que dizem respeito a sua forma, proprietários e regulamentações. Neste sentido, os próximos anos serão fundamentais para as definições e padronizações tecnológicas para IoT. Neste sentido, empresas como Google, Apple e outras estão lançando seus próprios ecossistemas IoT, respectivamente, *Google Weave* e *Apple HomeKit*. Entretanto, cada um possui protocolos, tecnologias de comunicação e padrões particulares. Isto torna a IoT não padronizada o que leva a um ecossistema que pode não prosperar. Assim, é preciso que a comunidade acadêmica e empresarial atentem-se às padronizações e na construção de um ecossistema favorável à IoT. Com isto será possível tornar os dispositivos *Plug & Play* e tornar a IoT livre de padrões proprietários. Em [Ishaq et al. 2013], os autores realizam uma revisão geral das padronizações em IoT.

Outra questão altamente relevante é a segurança para IoT. Este ponto, é uma das principais barreiras que impedem a efetiva adoção da IoT, pois os usuários estão preocupados com a violação dos seus dados. Deste modo, a segurança desempenha papel chave para a adoção da IoT. O escritor Dominique Guinard resume, em seu artigo sobre políticas para IoT<sup>55</sup>, que “*A segurança dos objetos inteligentes é tão forte quanto seu enlace mais fraco*”, isto é, as soluções de segurança ainda não estão consolidadas, portanto soluções devem ser propostas e discutidas detalhadamente.

Neste trabalho, foram descritos alguns dos princípios básicos da IoT através de uma abordagem teórica e prática. O aspecto dos objetos inteligentes e as tecnologias de comunicação foram abordados primeiramente. De forma complementar, discutimos os softwares que orquestram o funcionamento da IoT. Foram realizadas duas atividades práticas para consolidar o conteúdo. Também apresentou-se o modo como gerenciar e analisar dados oriundos de dispositivos inteligentes, destacando as principais técnicas utilizadas.

Por fim, um das maiores oportunidades, tanto para a academia quanto para a indústria, é o projeto de aplicações e serviços que gerem valor a partir dos dados obtidos

---

<sup>54</sup><http://homepages.dcc.ufmg.br/~bruno.ps/iot-tp-sbrc-2016/>

<sup>55</sup><http://techcrunch.com/2016/02/25/the-politics-of-the-internet-of-things/>

por dispositivos inteligentes. Ou seja, não é o fato de termos dados em uma grande quantidade que isso implique em um valor. Pelo contrário, é necessário investir fortemente em pesquisa para gerarmos produtos que sejam úteis para a sociedade.

## Referências

- [Al-Fuqaha et al. 2015] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., and Ayyash, M. (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 17(4):2347–2376.
- [Angell et al. 1983] Angell, J. B., Barth, P. W., and Terry, S. C. (1983). Silicon micromechanical devices. *Scientific American*, 248:44–55.
- [Ashton 2009] Ashton, K. (2009). That ‘internet of things’ thing. *RFiD Journal*, 22(7):97–114.
- [Bagula and Erasmus 2015] Bagula, B. and Erasmus, Z. (2015). Iot emulation with cooja. ICTP-IoT Workshop.
- [Barnaghi et al. 2012] Barnaghi, P., Wang, W., Henson, C., and Taylor, K. (2012). Semantics for the Internet of Things. *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 8(1):1–21.
- [Bettini et al. 2010] Bettini, C., Brdiczka, O., Henriksen, K., Indulska, J., Nicklas, D., Ranganathan, A., and Riboni, D. (2010). A survey of context modelling and reasoning techniques. *Pervasive and Mobile Computing*, 6(2):161–180.
- [Bisdikian et al. 2013] Bisdikian, C., Kaplan, L. M., and Srivastava, M. B. (2013). On the quality and value of information in sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 9(4):1–26.
- [Bishop 2006] Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- [Borges Neto et al. 2015] Borges Neto, J. B., Silva, T. H., Assunção, R. M., Mini, R. A. F., and Loureiro, A. A. F. (2015). Sensing in the Collaborative Internet of Things. *Sensors*, 15(3):6607–6632.
- [Boulis et al. 2011] Boulis, A. et al. (2011). Castalia: A simulator for wireless sensor networks and body area networks. *NICTA: National ICT Australia*.
- [Chaouchi 2013] Chaouchi, H. (2013). *The internet of things: connecting objects*. John Wiley & Sons.
- [Chlipala et al. 2004] Chlipala, A., Hui, J., and Tolle, G. (2004). Deluge: data dissemination for network reprogramming at scale. *University of California, Berkeley, Tech. Rep*.
- [Clausen et al. 2013] Clausen, T., Yi, J., Herberg, U., and Igarashi, Y. (2013). Observations of rpl: Ipv6 routing protocol for low power and lossy networks. draft-clausen-lln-rpl-experiences-05.
- [Da Xu et al. 2014] Da Xu, L., He, W., and Li, S. (2014). Internet of Things in industries: A survey. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 10(4):2233–2243.
- [Dey 2001] Dey, A. K. (2001). Understanding and using context. *Personal and ubiquitous computing*, 5(1):4–7.

- [Dobson and Ye 2006] Dobson, S. and Ye, J. (2006). Using fibrations for situation identification. In *Pervasive 2006 workshop proceedings*, pages 645–651.
- [Doddavenkatappa et al. 2012] Doddavenkatappa, M., Chan, M. C., and Ananda, A. L. (2012). *Testbeds and Research Infrastructure. Development of Networks and Communities: 7th International ICST Conference, TridentCom 2011, Shanghai, China, April 17-19, 2011, Revised Selected Papers*, chapter Indriya: A Low-Cost, 3D Wireless Sensor Network Testbed, pages 302–316. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Dunkels et al. 2004] Dunkels, A., Gronvall, B., and Voigt, T. (2004). Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN '04*, pages 455–462, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- [Fasolo et al. 2007] Fasolo, E., Rossi, M., Widmer, J., and Zorzi, M. (2007). In-network aggregation techniques for wireless sensor networks: a survey. *Wireless Communications, IEEE*, 14(2):70–87.
- [Forbes 2014] Forbes (2014). Internet of Things By The Numbers: Market Estimates And Forecasts.
- [Gartner 2015] Gartner, I. (2015). Gartner’s 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor.
- [Gnawali et al. 2009] Gnawali, O., Fonseca, R., Jamieson, K., Moss, D., and Levis, P. (2009). Collection Tree Protocol. In *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*.
- [Goldstein et al. 2005] Goldstein, S. C., Campbell, J. D., and Mowry, T. C. (2005). Programmable matter. *Computer*, 38(6):99–101.
- [Hui 2012] Hui, J. W. (2012). The routing protocol for low-power and lossy networks (rpl) option for carrying rpl information in data-plane datagrams.
- [Ishaq et al. 2013] Ishaq, I., Carels, D., Teklemariam, G. K., Hoebeker, J., Abeele, F. V. d., Poorter, E. D., Moerman, I., and Demeester, P. (2013). Ietf standardization in the field of the internet of things (iot): a survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(2):235–287.
- [Jakus et al. 2013] Jakus, G., Milutinovic, V., Omerovic, S., and Tomazic, S. (2013). *Concepts, Ontologies, and Knowledge Representation*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [Javaid et al. 2009] Javaid, N., Javaid, A., Khan, I., and Djouani, K. (2009). Performance study of ETX based wireless routing metrics. In *2nd IC4 2009*.
- [Kelly et al. 2013] Kelly, S. D. T., Suryadevara, N. K., and Mukhopadhyay, S. C. (2013). Towards the implementation of IoT for environmental condition monitoring in homes. *Sensors Journal, IEEE*, 13(10):3846–3853.
- [Khaleghi et al. 2013] Khaleghi, B., Khamis, A., Karray, F. O., and Razavi, S. N. (2013). Multi-sensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Information Fusion*, 14(1):28–44.
- [Kovatsch et al. 2011] Kovatsch, M., Duquennoy, S., and Dunkels, A. (2011). A low-power coap for contiki. In *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2011 IEEE 8th International Conference on*, pages 855–860. IEEE.

- [Kurose and Ross 2012] Kurose, J. F. and Ross, K. W. (2012). *Computer Networking: A Top-Down Approach (6th Edition)*. Pearson, 6th edition.
- [Kushalnagar et al. 2007] Kushalnagar, N., Montenegro, G., and Schumacher, C. (2007). Ipv6 over low-power wireless personal area networks (6lowpans): overview, assumptions, problem statement, and goals. Technical report.
- [Levis and Lee 2010] Levis, P. and Lee, N. (2010). TOSSIM: A Simulator for TinyOS Networks.
- [Levis et al. 2003] Levis, P., Lee, N., Welsh, M., and Culler, D. (2003). Tossim: Accurate and scalable simulation of entire tinyos applications. In *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '03*, pages 126–137, New York, NY, USA. ACM.
- [Levis et al. 2005] Levis, P., Madden, S., Polastre, J., Szewczyk, R., Whitehouse, K., Woo, A., Gay, D., Hill, J., Welsh, M., Brewer, E., and Culler, D. (2005). *Ambient Intelligence*, chapter TinyOS: An Operating System for Sensor Networks, pages 115–148. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Levis et al. 2004] Levis, P., Patel, N., Culler, D., and Shenker, S. (2004). Trickle: A self-regulating algorithm for code propagation and maintenance in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st Conference on Symposium on Networked Systems Design and Implementation - Volume 1, NSDI'04*, pages 2–2, Berkeley, CA, USA. USENIX Association.
- [Lin et al. 2003] Lin, J., Keogh, E., Lonardi, S., and Chiu, B. (2003). A symbolic representation of time series, with implications for streaming algorithms. In *Proceedings of the 8th ACM SIGMOD workshop on Research issues in data mining and knowledge discovery - DMKD '03*, pages 2 – 11, New York, New York, USA. ACM Press.
- [Liu et al. 2013] Liu, V., Parks, A., Talla, V., Gollakota, S., Wetherall, D., and Smith, J. R. (2013). Ambient backscatter: wireless communication out of thin air. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 43(4):39–50.
- [Loureiro et al. 2003] Loureiro, A. A., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. d. F., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). Redes de Sensores Sem Fio. In *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, pages 179–226.
- [Mattern and Floerkemeier 2010] Mattern, F. and Floerkemeier, C. (2010). From the internet of computers to the internet of things. In *From active data management to event-based systems and more*, pages 242–259. Springer.
- [Min et al. 2011] Min, Z., Bei, W., Chunyuan, G., and Zhao qian, S. (2011). *Applied Informatics and Communication: International Conference, ICAIC 2011, Xi'an, China, August 20-21, 2011, Proceedings, Part IV*, chapter Application Study of Precision Agriculture Based on Ontology in the Internet of Things Environment, pages 374–380. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Mitchell 1997] Mitchell, T. M. (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 1 edition.
- [Morettin and Toloï 2006] Morettin, P. A. and Toloï, C. M. C. (2006). *Análise de Séries Temporais*. Blucher, São Paulo, 2nd edition.

- [Murphy 2012] Murphy, K. P. (2012). *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. The MIT Press.
- [Österlind ] Österlind, F. *A Sensor Network Simulator for the Contiki OS*.
- [Patel and Rutvij H. 2015] Patel, K. N. and Rutvij H., J. (2015). A survey on emulation testbeds for mobile ad-hoc networks. *Procedia Computer Science*, 45:581–591.
- [Paulo F. Pires 2015] Paulo F. Pires, Flavia C. Delicato, T. B. (2015). Plataformas para a Internet das Coisas.
- [Perera et al. 2014] Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., and Georgakopoulos, D. (2014). Context aware computing for the internet of things: A survey. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 16(1):414–454.
- [Peterson and Davie 2011] Peterson, L. L. and Davie, B. S. (2011). *Computer Networks, Fifth Edition: A Systems Approach*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 5th edition.
- [Ramos et al. 2012] Ramos, H. S., Oliveira, E. M., Boukerche, A., Frery, A. C., and Loureiro, A. A. (2012). Characterization and mitigation of the energy hole problem of many-to-one communication in wireless sensor networks. In *Computing, Networking and Communications (ICNC), 2012 International Conference on*, pages 954–958. IEEE.
- [Rani and Sikka 2012] Rani, S. and Sikka, G. (2012). Recent Techniques of Clustering of Time Series Data: A Survey. *International Journal of Computer Applications*, 52(15):1–9.
- [RERUM 2015] RERUM (2015). Advanced techniques to increase the lifetime of smart objects and ensure low power network operation. *RERUM*.
- [Ruiz et al. 2004] Ruiz, L. B., Correia, L. H. A., Vieira, L. F. M., Macedo, D. F., Nakamura, E. F., Figueiredo, C. M., Vieira, M. A. M., Bechelane, E. H., Camara, D., Loureiro, A. A., et al. (2004). Arquiteturas para redes de sensores sem fio.
- [Saltzer et al. 1984] Saltzer, J. H., Reed, D. P., and Clark, D. D. (1984). End-to-end arguments in system design. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 2(4):277–288.
- [Santos et al. 2015a] Santos, B., Vieira, M., and Vieira, L. (2015a). eXtend collection tree protocol. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 IEEE*, pages 1512–1517.
- [Santos et al. 2015b] Santos, B. P., Menezes Vieira, L. F., and Menezes Vieira, M. A. (2015b). CRAL: a centrality-based and energy efficient collection protocol for low power and lossy networks. In *Computer Networks and Distributed Systems (SBRC), 2015 XXXIII Brazilian Symposium on*, pages 159–170. IEEE.
- [Schafer and Graham 2002] Schafer, J. L. and Graham, J. W. (2002). Missing data: Our view of the state of the art. *Psychological Methods*, 7(2):147–177.
- [Shelby and Bormann 2011] Shelby, Z. and Bormann, C. (2011). *6LoWPAN: The wireless embedded Internet*, volume 43. John Wiley & Sons.
- [Silva et al. 2014] Silva, T., Vaz De Melo, P., Almeida, J., and Loureiro, A. (2014). Large-scale study of city dynamics and urban social behavior using participatory sensing. *Wireless Communications, IEEE*, 21(1):42–51.

- [Sundmaecker et al. 2010] Sundmaecker, H., Guillemin, P., Friess, P., and Woelfflé, S. (2010). *Vision and challenges for realising the Internet of Things*, volume 20. EUR-OP.
- [Tanenbaum 2002] Tanenbaum, A. (2002). *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 4th edition.
- [Tanenbaum 2011] Tanenbaum, A. (2011). *Computer Networks*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 5th edition.
- [Tsvetko 2011] Tsvetko, T. (2011). Rpl: Ipv6 routing protocol for low power and lossy networks. In *Seminar Sensorknoten: Betrieb, Netze und Anwendungen SS*.
- [Varga et al. 2001] Varga, A. et al. (2001). The omnet++ discrete event simulation system. In *Proceedings of the European simulation multiconference (ESM'2001)*, volume 9, page 65. sn.
- [Varga and Hornig 2008] Varga, A. and Hornig, R. (2008). An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. In *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops, Simutools '08*, pages 60:1–60:10, ICST, Brussels, Belgium, Belgium. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering).
- [Vasseur et al. 2011] Vasseur, J., Agarwal, N., Hui, J., Shelby, Z., Bertrand, P., and Chauvenet, C. (2011). Rpl: The ip routing protocol designed for low power and lossy networks. Internet Protocol for Smart Objects (IPSO) Alliance.
- [Vasseur and Dunkels 2010] Vasseur, J.-P. and Dunkels, A. (2010). *Interconnecting Smart Objects with IP: The Next Internet*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- [Wang et al. 2015] Wang, F., Hu, L., Zhou, J., and Zhao, K. (2015). A Survey from the Perspective of Evolutionary Process in the Internet of Things. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015.
- [Warren Liao 2005] Warren Liao, T. (2005). Clustering of time series data - A survey. *Pattern Recognition*, 38(11):1857–1874.
- [Weingärtner et al. 2009] Weingärtner, E., Vom Lehn, H., and Wehrle, K. (2009). A performance comparison of recent network simulators. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications, ICC'09*, pages 1287–1291, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- [Yan et al. 2013] Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., and Tipper, D. (2013). A Survey on Smart Grid Communication Infrastructures: Motivations, Requirements and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1):5–20.