



Pós-Graduação em Ciência da Computação

# “OpenDevice: Uma Plataforma Aberta e Framework para Internet das Coisas (IoT)”

Por

**Ricardo Jorge Luz Rufino**

Dissertação de Mestrado



Universidade Federal de Pernambuco  
posgraduacao@cin.ufpe.br  
[www.cin.ufpe.br/~posgraduacao](http://www.cin.ufpe.br/~posgraduacao)

RECIFE, Fevereiro/2016



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Informática  
Pós-graduação em Ciência da Computação

Ricardo Jorge Luz Rufino

## **“OpenDevice: Uma Plataforma Aberta e Framework para Internet das Coisas (IoT)”**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-graduação em  
Ciência da Computação do Centro de Informática da Univer-  
sidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.*

Orientador: *Kelvin Lopes Dias*

RECIFE, Fevereiro/2016

*Aos meus pais, a quem amo muito.*

# Resumo

A Internet das Coisas (IoT) é uma área que vem atraindo a atenção tanto do meio acadêmico quanto da indústria e demanda uma complexa arquitetura com diversos componentes, que integram hardwares, sensores e atuadores dos mais variados protocolos e interfaces. A Internet das Coisas irá mudar a forma como nos comportamos e interagimos com o ambiente, gerando novos serviços nas áreas da saúde, educação, lazer, esportes, automação, etc.

Por ser uma área relativamente nova, vem sofrendo também com os problemas devido à falta de padronização. Dessa forma, a criação de projetos de IoT se tornam desafiadores, com custo e tempo elevados ou acabam tendo uma baixa qualidade, pois os desenvolvedores têm que resolver problemas comuns, porém complexos, como definição de protocolos e gerenciamento de dispositivos, o que atrasa o desenvolvimento e a geração de soluções inovadoras.

Nesta dissertação propõe-se um framework completo e flexível que auxilia no desenvolvimento de soluções de Internet das Coisas, como: automação residencial, monitoramento de sensores, controle de robôs, monitoramento de energia e cidades inteligentes, abordando todas as plataformas envolvidas: Desktop, Web, Mobile, Hardware e oferecendo serviços para gerenciamento de dispositivos, conexões, armazenamento de dados e visualização, bem como a proposta de um protocolo para a comunicação com hardwares de baixo custo, baseados na plataforma Arduino, ESP8266, Raspberry Pi e similares, podendo operar usando as tecnologias USB, Bluetooth, Ethernet, WiFi e com protocolos abertos, como MQTT e WebSocket.

Foram implementados cenários no contexto de automação residencial/predial e integração com plataformas 3D, para avaliar a proposta da arquitetura, componentes e capacidades de extensibilidade, partindo de uma aplicação mais simples para uma aplicação mais complexa.

**Palavras-chave:** Internet das Coisas, IoT, Framework, Middleware, Arduino, MQTT, Sistemas Embarcados, Automação Residencial.

# Abstract

The Internet of Things (IoT) is an area that has attracted much attention from academia as industry and demanded a complex architecture with various components that integrate hardware, sensors and actuators of various protocols and interfaces. The Internet of Things will change the way we behave and interact with the environment, creating new services in the areas of health, education, leisure, sports, automation, etc.

Being a relatively new area, it is also suffering from problems due to lack of standardization. Thus, the creation of IoT projects become challenging, with cost and high time or end up with a low quality because developers have to solve common problems, however complex, as the definition of protocols and device management, which slows development and the generation of innovative solutions.

This work proposes a complete and flexible framework that helps in the development of Internet solutions of things, such as home automation, sensor monitoring, robot control, energy monitoring and smart cities, covering all involved platforms: Desktop, Web Mobile, Hardware and offering services for device management, connections, data storage and visualization as well a proposed protocol for communication with low-cost hardware, based on the Arduino platform, ESP8266, Raspberry Pi and the like, can operate using the USB technologies, Bluetooth, Ethernet, WiFi and open protocols as MQTT and WebSocket.

Scenarios were implemented in the context of home automation / building and integration with 3D platforms to evaluate the proposed architecture, components and extensibility capabilities, starting from a simple application to a more complex application.

**Keywords:** Internet of Things, IoT, Framework, Middleware, Arduino, MQTT, Embedded Systems, Home Automation.

# Sumário

|  |            |
|--|------------|
| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>xii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>  | <b>xiv</b> |
| <b>Lista de Acrônimos</b>                                      | <b>xvi</b> |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivação . . . . .  | 2          |
| 1.1.1 Desafios . . . . .                                       | 3          |
| 1.2 Objetivos . . . . .  | 4          |
| 1.3 Organização da Dissertação . . . . .                       | 5          |
| <b>2 Fundamentação Teórica</b>                                 | <b>6</b>   |
| 2.1 Internet das Coisas . . . . .                              | 6          |
| 2.2 Sistemas Embarcados . . . . .                              | 9          |
| 2.2.1 Tipos de Sistemas Embarcados . . . . .                   | 10         |
| 2.2.2 Microcontroladores . . . . .                             | 11         |
| Diferenças entre Microprocessador e Microcontrolador . . . . . | 13         |
| 2.2.3 Mini PCs . . . . .                                       | 14         |
| 2.2.4 Linguagens de Programação . . . . .                      | 14         |
| 2.3 Plataformas de Desenvolvimento . . . . .                   | 15         |
| 2.3.1 Arduino . . . . .  | 15         |
| Características de Hardware . . . . .                          | 16         |
| Características de Software . . . . .                          | 17         |
| 2.3.2 Raspberry Pi . . . . .                                   | 17         |
| Características de Hardware . . . . .                          | 18         |
| Características de Software . . . . .                          | 20         |
| 2.3.3 BeagleBone . . . . .                                     | 20         |
| Características de Hardware . . . . .                          | 21         |
| Características de Software . . . . .                          | 22         |
| 2.3.4 ESP8266 . . . . .  | 23         |
| Características de Hardware . . . . .                          | 23         |
| Características de Software . . . . .                          | 24         |
| 2.4 Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) . . . . .                  | 25         |

---

|          |                               |           |
|----------|-------------------------------|-----------|
| 2.5      | RFID                          | 27        |
| 2.6      | Tecnologias de Comunicação    | 29        |
| 2.6.1    | Tecnologias não IP            | 29        |
|          | ZigBee                        | 29        |
|          | Bluetooth                     | 30        |
|          | Bluetooth LE (Low Energy)     | 31        |
|          | Z-WAVE                        | 32        |
| 2.6.2    | Tecnologias IP                | 33        |
|          | Wi-Fi                         | 33        |
|          | 6LoWPAN                       | 34        |
| 2.7      | Protocolos                    | 35        |
| 2.7.1    | REST                          | 35        |
| 2.7.2    | WebSocket                     | 36        |
| 2.7.3    | CoAP                          | 38        |
| 2.7.4    | MQTT                          | 39        |
|          | Arquitetura                   | 40        |
|          | Formato da Mensagem           | 41        |
| 2.8      | Middleware                    | 43        |
| 2.8.1    | Padronização                  | 46        |
| 2.9      | Considerações Finais          | 47        |
| <b>3</b> | <b>Trabalhos Relacionados</b> | <b>48</b> |
| 3.1      | OpenIoT                       | 48        |
| 3.2      | Eclipse IoT                   | 51        |
| 3.2.1    | Padrões e Protocolos          | 52        |
| 3.2.2    | Frameworks e Serviços         | 52        |
| 3.3      | BUTLER                        | 53        |
| 3.4      | LinkSmart (HYDRA)             | 56        |
| 3.5      | TinyDB                        | 56        |
| 3.6      | IoT@Work                      | 57        |
| 3.6.1    | Arquitetura                   | 58        |
| 3.6.2    | Tecnologias Integradas        | 59        |
| 3.7      | Plataformas Comerciais        | 60        |
| 3.7.1    | Google                        | 60        |
| 3.7.2    | Oracle                        | 61        |
| 3.7.3    | Salesforce - IoT Cloud        | 61        |

---

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.7.4    | IBM . . . . .   | 61        |
| 3.7.5    | Amazon IoT . . . . .                                  | 61        |
| 3.7.6    | Microsoft . . . . .                                   | 62        |
| 3.7.7    | Intel . . . . .                                       | 62        |
| 3.7.8    | Xynvely . . . . .                                     | 62        |
| 3.8      | Considerações Finais . . . . .                        | 63        |
| 3.8.1    | Análise das Plataformas Abertas . . . . .             | 63        |
| 3.8.2    | Análise das Plataformas Comerciais . . . . .          | 65        |
| <b>4</b> | <b>Arquitetura Proposta</b>                           | <b>66</b> |
| 4.1      | Visão Geral . . . . .                                 | 67        |
| 4.1.1    | Componentes da Visão Geral . . . . .                  | 68        |
| 4.1.2    | Modelos de comunicação . . . . .                      | 70        |
| 4.1.3    | Requisitos . . . . .                                  | 71        |
| 4.1.4    | Extensibilidade . . . . .                             | 72        |
| 4.2      | Arquitetura detalhada . . . . .                       | 73        |
| 4.2.1    | Camadas da Arquitetura . . . . .                      | 74        |
| 4.2.2    | Módulos . . . . .                                     | 76        |
| 4.3      | Gerenciamento de Dispositivos . . . . .               | 78        |
| 4.4      | Modelo Orientado a Eventos . . . . .                  | 81        |
| 4.5      | API de Comandos . . . . .                             | 82        |
| 4.6      | Mecanismo de extensão . . . . .                       | 83        |
| 4.6.1    | Framework de Conexões . . . . .                       | 84        |
| 4.7      | Módulos Servidores . . . . .                          | 86        |
| 4.7.1    | Servidor MQTT . . . . .                               | 88        |
| 4.7.2    | Servidores WebSocket, Rest e Http . . . . .           | 89        |
| 4.8      | Suporte a JavaScript . . . . .                        | 90        |
| 4.8.1    | Criação de aplicações nativas em JavaScript . . . . . | 91        |
| 4.8.2    | Tratadores de Eventos (EventHook) . . . . .           | 92        |
| 4.8.3    | Criação de aplicações WEB em JavaScript . . . . .     | 92        |
| 4.9      | Visualização e controle dos dispositivos . . . . .    | 93        |
| 4.10     | Serviço de descoberta . . . . .                       | 94        |
| 4.11     | APIs para Aplicações Cliente . . . . .                | 97        |
| 4.11.1   | Implementação . . . . .                               | 97        |
|          | USB . . . . .   | 98        |
|          | Bluetooth . . . . .                                   | 98        |

---



---

|   |     |
|---|-----|
| Socket (TCP) . . . . .  | 99  |
| WebSocket . . . . .   | 99  |
| 4.12 Armazenamento . . . . .  | 99  |
| 4.13 Firmware . . . . .   | 100 |
| 4.13.1 Visão Geral . . . . .  | 100 |
| 4.13.2 Meios de comunicação suportados . . . . .                          | 101 |
| 4.13.3 Gerenciamento de conexões . . . . .                                | 101 |
| 4.13.4 Gerenciamento dos dispositivos . . . . .                           | 102 |
| Dispositivos suportados . . . . .   | 103 |
| 4.13.5 Comandos de Usuário . . . . .                                      | 103 |
| 4.13.6 Mecanismos de leitura de sensores . . . . .                        | 104 |
| Modo Síncrono (Polling) . . . . .   | 104 |
| Modo Assíncrono (Interrupções) . . . . .                                  | 105 |
| 4.13.7 Configuração dinâmica e parametrizações . . . . .                  | 107 |
| 4.13.8 Monitoramento . . . . .  | 107 |
| 4.13.9 Extensibilidade . . . . .  | 108 |
| Mecanismo “Custom Connections” . . . . .                                  | 109 |
| 4.14 Fluxo de Mensagens . . . . .   | 110 |
| 4.14.1 Envio de Comandos . . . . .  | 110 |
| 4.14.2 Processamento dos Comandos (Dispositivo) . . . . .                 | 111 |
| 4.14.3 Recebimento de Comandos . . . . .                                  | 112 |
| 4.14.4 Leitura de Sensores . . . . .                                      | 113 |
| Leitura Síncrona (Polling) . . . . .                                      | 113 |
| Leitura Assíncrona (Interrupções) . . . . .                               | 114 |
| 4.14.5 Envio de Comandos (Aplicação - Middleware - Dispositivo) . . . . . | 115 |
| 4.15 Protocolo . . . . .  | 116 |
| 4.15.1 Formato da Mensagem . . . . .                                      | 117 |
| Convenções e pontos em aberto . . . . .                                   | 118 |
| 4.15.2 Tipos de Comandos . . . . .  | 118 |
| 4.15.3 Comando: DIGITAL . . . . .   | 119 |
| 4.15.4 Comando: ANALOG . . . . .  | 120 |
| 4.15.5 Comando: NUMERIC . . . . .   | 120 |
| 4.15.6 Reposta: COMMAND_RESPONSE . . . . .                                | 120 |
| 4.15.7 Comando: SET_PROPERTY . . . . .                                    | 121 |
| 4.15.8 Comando: GET_PROPERTIES . . . . .                                  | 122 |

---

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.15.9   | Comando: GET_PROPERTIES_RESPONSE . . . . . | 122        |
| 4.15.10  | Comando: ACTION . . . . .                  | 123        |
| 4.15.11  | Comando: GET_ACTIONS . . . . .             | 123        |
| 4.15.12  | Comando: GET_ACTIONS_RESPONSE . . . . .    | 123        |
| 4.15.13  | Comando: PING_REQUEST . . . . .            | 124        |
| 4.15.14  | Resposta: PING_RESPONSE . . . . .          | 124        |
| 4.15.15  | Comando: DISCOVERY_REQUEST . . . . .       | 124        |
| 4.15.16  | Resposta: DISCOVERY_RESPONSE . . . . .     | 124        |
| 4.15.17  | Comando: GET_DEVICES . . . . .             | 125        |
| 4.15.18  | Resposta: GET_DEVICES_RESPONSE . . . . .   | 125        |
| 4.15.19  | Comando: DEVICE_ADD . . . . .              | 126        |
| 4.15.20  | Comando: DEVICE_DEL . . . . .              | 126        |
| 4.15.21  | Tipo: DeviceInfo . . . . .                 | 126        |
| <b>5</b> | <b>Avaliação Experimental</b>              | <b>128</b> |
| 5.1      | Hardwares Testados . . . . .               | 128        |
| 5.1.1    | Microcontroladores (Firmware) . . . . .    | 129        |
| 5.1.2    | Mini PCs . . . . .                         | 129        |
| 5.2      | Testes de Performance . . . . .            | 130        |
| 5.2.1    | Procedimento de Medição . . . . .          | 130        |
| 5.2.2    | Métrica Utilizada . . . . .                | 131        |
| 5.2.3    | Resultados: Conexão USB . . . . .          | 131        |
| 5.2.4    | Resultados: Conexão Bluetooth . . . . .    | 132        |
| 5.2.5    | Resultados: Conexão Ethernet . . . . .     | 132        |
| 5.3      | Integração com Ambientes 3D . . . . .      | 132        |
| 5.3.1    | Integração - jMonkeyEngine. . . . .        | 133        |
| 5.3.2    | Integração - Blender. . . . .              | 133        |
| 5.4      | Estudo de Caso . . . . .                   | 135        |
| 5.4.1    | Resumo . . . . .                           | 136        |
| 5.4.2    | Ambiente de Teste . . . . .                | 137        |
| 5.4.3    | Cenário 1 . . . . .                        | 137        |
| 5.4.4    | Cenário 2 . . . . .                        | 139        |
| 5.5      | Considerações Finais . . . . .             | 142        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões</b>                          | <b>144</b> |
| 6.1      | Contribuições . . . . .                    | 145        |

---

---

|  |            |
|--|------------|
| 6.2 Trabalhos Futuros . . . . .            | 146        |
| <b>Referências Bibliográficas</b>          | <b>147</b> |
| <b>Apêndice</b>                            | <b>159</b> |
| <b>Exemplo de Aplicação em JavaFX + JS</b> | <b>160</b> |

# Lista de Figuras

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.1  | Principais áreas de adoção . . . . .                               | 9   |
| 2.2  | Tipos de Sistemas Embarcados [21] . . . . .                        | 10  |
| 2.3  | Diagrama de Blocos - PIC16F887 [24] . . . . .                      | 12  |
| 2.4  | Placa Arduino . . . . .  | 16  |
| 2.5  | IDE do Arduino . . . . .   | 18  |
| 2.6  | Raspberry Pi 2 - Model B [35] . . . . .                            | 19  |
| 2.7  | BeagleBone Black [42] . . . . .                                    | 21  |
| 2.8  | Placa ESP8266 . . . . .  | 24  |
| 2.9  | Visão geral do RFID passivo [62] . . . . .                         | 28  |
| 2.10 | Pilha do protocolo Bluetooth [74] . . . . .                        | 31  |
| 2.11 | Topologias de redes Bluetooth . . . . .                            | 31  |
| 2.12 | Pilhas do protocolo IP e 6LoWPAN [82] . . . . .                    | 35  |
| 2.13 | Comparação de comunicação entre Pulling e WebSocket [88] . . . . . | 37  |
| 2.14 | Visão geral da arquitetura CoAP [92] . . . . .                     | 39  |
| 2.15 | Padrão MQTT - Publish/Subscribe [95] . . . . .                     | 41  |
| 2.16 | Formato da mensagem MQTT [96] . . . . .                            | 41  |
| 2.17 | Componente do Middleware de IoT [7] . . . . .                      | 44  |
| 3.1  | Arquitetura OpenIoT [82] . . . . .                                 | 50  |
| 3.2  | Arquitetura proposta por BUTLER [108] . . . . .                    | 55  |
| 3.3  | Arquitetura IOT@Work - Camadas funcionais [114] . . . . .          | 59  |
| 4.1  | Visão Geral . . . . .  | 68  |
| 4.2  | Arquitetura detalhada . . . . .                                    | 75  |
| 4.3  | Módulos . . . . .  | 77  |
| 4.4  | Diagrama de classe simplificado dos Comandos . . . . .             | 84  |
| 4.5  | Diagrama de classe das conexões . . . . .                          | 85  |
| 4.6  | Exemplo de implementação da conexão bluetooth . . . . .            | 86  |
| 4.7  | Fluxo de conexão e descoberta . . . . .                            | 88  |
| 4.8  | Interface de controle de dispositivos . . . . .                    | 94  |
| 4.9  | Interface de Dashboards Gráficos . . . . .                         | 94  |
| 4.10 | Fluxo de conexão e descoberta . . . . .                            | 96  |
| 4.11 | Arquitetura do Firmware . . . . .                                  | 101 |
| 4.12 | Execução de uma interrupção . . . . .                              | 106 |

---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.13 | Envio de Comandos . . . . .                       | 111 |
| 4.14 | Processamento dos Comandos . . . . .              | 112 |
| 4.15 | Recebimento de Comandos . . . . .                 | 113 |
| 4.16 | Leitura de Sensores no modo Polling . . . . .     | 114 |
| 4.17 | Leitura de Sensores usando Interrupções . . . . . | 115 |
| 4.18 | Envio de comandos . . . . .                       | 116 |
| 4.19 | Formato do protocolo OpenDevice . . . . .         | 117 |
| 4.20 | Comando: DIGITAL . . . . .                        | 120 |
|      |   |     |
| 5.1  | Teste de performance - USB . . . . .              | 131 |
| 5.2  | Teste de performance - Bluetooth . . . . .        | 132 |
| 5.3  | Teste de performance - Ethernet . . . . .         | 132 |
| 5.4  | Integração com a JMonkeyEngine . . . . .          | 134 |
| 5.5  | Integração com o Blender . . . . .                | 135 |
| 5.6  | Teste de desempenho do cliente Python . . . . .   | 136 |
| 5.7  | Diagrama - Cenário 1 . . . . .                    | 138 |
| 5.8  | Diagrama - Cenário 2 . . . . .                    | 140 |

# Lista de Tabelas

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 2.1  | MQTT - Tipos de mensagem [93]               | 42  |
| 2.2  | MQTT - Níveis de QoS [93]                   | 43  |
| 4.1  | Nomenclatura de tópicos MQTT                | 89  |
| 4.2  | APIs Clientes                               | 97  |
| 4.3  | Comunicação suportada pelo firmware         | 101 |
| 4.4  | Dispositivos suportados nativamente         | 104 |
| 4.5  | Tipos de comandos do protocolo              | 119 |
| 4.6  | Parâmetros - Comando: DIGITAL               | 120 |
| 4.7  | Resposta: COMMAND_RESPONSE                  | 121 |
| 4.8  | Parâmetros - Comando: COMMAND_RESPONSE      | 121 |
| 4.9  | Status da resposta do comando               | 121 |
| 4.10 | Comando: SET_PROPERTY                       | 121 |
| 4.11 | Parâmetros: SET_PROPERTY                    | 122 |
| 4.12 | Comando: GET_PROPERTIES                     | 122 |
| 4.13 | Parâmetros: GET_PROPERTIES                  | 122 |
| 4.14 | Comando: GET_PROPERTIES_RESPONSE            | 122 |
| 4.15 | Parâmetros: GET_PROPERTIES_RESPONSE         | 122 |
| 4.16 | Comando: ACTION                             | 123 |
| 4.17 | Parâmetros: ACTION                          | 123 |
| 4.18 | Comando: GET_ACTIONS                        | 123 |
| 4.19 | Parâmetros: GET_ACTIONS                     | 123 |
| 4.20 | Comando: GET_ACTIONS_RESPONSE               | 124 |
| 4.21 | Parâmetros: GET_ACTIONS_RESPONSE            | 124 |
| 4.22 | Comando: GET_ACTIONS_RESPONSE               | 124 |
| 4.23 | Parâmetros: GET_ACTIONS_RESPONSE            | 125 |
| 4.24 | Comando: GET_DEVICES                        | 125 |
| 4.25 | Parâmetros: GET_DEVICES                     | 125 |
| 4.26 | Resposta: GET_DEVICES_RESPONSE              | 125 |
| 4.27 | Parâmetros - Resposta: GET_DEVICES_RESPONSE | 125 |
| 4.28 | Comando: DEVICE_ADD                         | 126 |
| 4.29 | Parâmetros: DEVICE_ADD                      | 126 |
| 4.30 | Comando: DEVICE_DEL                         | 126 |
| 4.31 | Parâmetros: DEVICE_DEL                      | 126 |

---

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.32 | Objeto: DeviceInfo . . . . .                      | 127 |
| 4.33 | Tipos de Dispositivos . . . . .                   | 127 |
| 5.1  | Hardwares Testados (Microcontroladores) . . . . . | 129 |
| 5.2  | Hardwares Testados (Módulos) . . . . .            | 129 |
| 5.3  | Hardwares Testados (Mini PCs) . . . . .           | 130 |

# Lista de Acrônimos

|              |   |
|--------------|---|
| <b>IoT</b>   | Internet Of Things                          |
| <b>JVM</b>   | Java Virtual Machine                        |
| <b>MQTT</b>  | MQ Telemetry Transport                      |
| <b>REST</b>  | Representational State Transfer             |
| <b>HTTP</b>  | Hypertext Transfer Protocol                 |
| <b>RAM</b>   | Random Access Memory                        |
| <b>JNI</b>   | Java Native Interface                       |
| <b>API</b>   | Application Programming Interface           |
| <b>UDP</b>   | User Datagram Protocol                      |
| <b>UART</b>  | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| <b>USB</b>   | Universal Serial Bus                        |
| <b>EPROM</b> | Erasable Programmable Read-Only Memory      |
| <b>RFID</b>  | Radio Frequency Identification              |
| <b>ISR</b>   | Interrupt Service Routine                   |
| <b>IDE</b>   | Integrated Development Environment          |
| <b>GPIO</b>  | General Purpose Input/Output                |
| <b>PCB</b>   | Printed Circuit Board                       |
| <b>LED</b>   | Light Emitting Diode                        |



# 1

## Introdução

A Internet das Coisas ou Internet of Things (IoT)[1], em inglês, é um termo utilizado para descrever um paradigma tecnológico no qual os objetos físicos estão conectados em rede e se comunicam através da Internet, gerando informações, atuando de forma inteligente a eventos, integrando aplicações e serviços.

A IoT é umas das principais tecnologias emergentes, é considerada a terceira onda de desenvolvimento da Internet[2], e assim como as duas primeiras ondas, promete trazer profundas mudanças na economia. Essa “revolução” vem impulsionando mudanças nos padrões da própria Internet, a fim de atender uma escala nunca antes vista de “coisas” conectadas, e inevitavelmente, promovendo para vida cotidiana, trabalho, saúde e negócios.

Recentes avanços tecnológicos tem impulsionado o desenvolvimento da Internet das Coisas, a citar: (1) redução dos custos de sensores e microprocessadores, permitindo a criação de dispositivos “mais inteligentes”, (2) redução no custo de banda da internet, algo estimado em 40x nos últimos 10 anos, (3) a presença massiva de smartphones, tornando-se uma ferramenta para geração de dados, visualização e controle, (4) BigData, com a capacidade de processar enorme quantidades de dados e gerar informações estratégicas para os negócios e (5) a alta disponibilidade de acesso a rede internet de maneira quase ubíqua[2].

O potencial estimado da Internet das Coisas tem despertado o interesse e investimento de grandes empresas como Google, Microsoft, Intel, Oracle, IBM, Cisco, Sansung. Não somente empresa, mas projetos e fundações ligadas ao “ecossistema” open source, como Eclipse, Arduino, Ubuntu/Linux, vem apostando na Internet das Coisas.

Apesar dos benefícios e oportunidades, ainda existem uma série de desafios que precisam ser superados para uma transição completa para a Internet das Coisas[3, 4]. Os desafios estão relacionados à heterogeneidade, escalabilidade, interoperabilidade, segurança, privacidade, grande volumes de dados, complexidade do software e do hardware, que estão inseridos com graus de relevâncias diferenciados nas áreas da saúde, transportes, telecomunicações, automação, etc.

Um enorme esforço de investigação é necessário para fazer a IoT viável, uma vez que muitas questões em aberto ainda persistem nesta área. A comunidade científica está oferecendo várias tentativas para padronizar totalmente o paradigma IoT. Além disso, o grande número de dispositivos que são esperados integrar o ambiente de IoT, obriga um esquema de endereçamento eficaz. Tais questões são geralmente discutidos na literatura[5, 6].

## 1.1 Motivação

A Internet das Coisas é uma grande oportunidade para empresas e desenvolvedores criarem novas soluções que conectem dispositivos à Internet. Novos dispositivos, sensores, microcontroladores e plataformas de desenvolvimento vêm surgindo, impulsionados por essas oportunidades e pelo desenvolvimento da Internet das Coisas. Porém, essa grande quantidade de dispositivos heterogêneos, decorrente da inerente diversidade de tecnologias de hardware e software, se tornam um dos principais desafios para o desenvolvimento de aplicações.

Devido à falta do estabelecimento de padrões das plataformas de hardware e software, os desenvolvedores acabam criando suas próprias soluções, o que contribui para o problema da interoperabilidade. Muitas das soluções elaboradas, acabam tendo uma baixa qualidade, são fechadas (proprietárias) ou devido a sua complexidade acabam atrasando ou mesmo inviabilizando o atendimento dos principais requisitos, que é gerar valor de mercado e promover a inovação.

Nesse contexto, plataformas de middleware são avaliadas como soluções promissoras para prover tal interoperabilidade, realizar o gerenciamento da crescente quantidade de dispositivos e integrar aplicações[4]. Tais plataformas oferecem um meio padronizado para o acesso aos dados e serviços através de uma interface de alto nível[7], com isso as aplicações não precisam lidar com os detalhes de baixo nível relacionados às especifi-

idades de cada dispositivo e padrões de comunicação. A adoção de uma plataforma de middleware, pode contribuir para facilitar o desenvolvimento de projetos de IoT.

Existem cerca de 9 milhões de desenvolvedores Java, o fornecimento de frameworks e serviços *open source* em plataforma Java irá tornar mais fácil a adoção da linguagem para projetos de Internet das Coisas e favorecer possíveis contribuições para o desenvolvimento e aprimoramento da solução proposta nesse trabalho.

### 1.1.1 Desafios

Sistemas baseados em Internet das Coisas podem ser usado para diferentes fins e áreas, de modo que, temos de enfrentar diferentes desafios. Nesta seção, vamos explicar alguns dos desafios que precisam ser considerados nas atividades de investigação:

- **Tecnologias de Borda:** Ao nível do hardware, são necessários mais esforços de investigação para desenvolver a tecnologia de dispositivos embarcados, sensores, atuadores e identificação (passiva e ativa), uma vez que um sistema baseado na Internet das Coisas deve ser capaz de reunir informações suficientes sobre o mundo real, empregando uma grande variedade de dispositivos e ambientes. Assim, exige-se mais esforços para conectar dispositivos heterogêneos e implantá-los em aplicações da Internet das Coisas, e para fornecer suporte para novos dispositivos.
- **Tecnologias de Rede:** Em IoT, as coisas estão ligadas através de diferentes tipos de redes, ou seja, rede móvel, com e sem fio. Estas redes fornecem comunicação bidirecional em diferentes níveis entre os objetos do mundo real, aplicações e serviços que são utilizados pelas aplicações da Internet das Coisas. Esta estrutura altamente distribuída deve fornecer interconexão com baixo consumo de energia, enquanto os dados distribuídas podem causar problemas de privacidade.
- **Middleware:** Em IoT, temos redes e dispositivos heterogêneos. Sua heterogeneidade pode potencialmente aumentar com as novas tecnologias. Para facilitar a utilização destes dispositivos por aplicações da Internet das Coisas, devemos proteger a sua heterogeneidade. Portanto, precisamos desenvolver um middleware seguro, escalável e semanticamente enriquecido para lidar com a heterogeneidade dos dispositivos.
- **Plataformas de Serviços:** Eles suportam uma gestão de alto nível de todos os

dispositivos envolvidos, de forma integrada, garantindo a escalabilidade, alta disponibilidade, e a execução segura das funcionalidades solicitadas a partir de dispositivos.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos que este trabalho pretende alcançar, são listados a seguir:

- **Facilitar o desenvolvimento de aplicações:** provendo soluções que facilitem o desenvolvimento de projetos inovadoras para Internet das Coisas, com menor custo e tempo possível, abstraindo os detalhes mais complexos da comunicação, gerenciamento e visualização, permitindo que os desenvolvedores possam contribuir para evolução do ecossistema da Internet das Coisas.
- **Solução completa para integração entre plataformas:** oferecendo soluções para o desenvolvimento e integração de projetos nas plataformas de Hardware, Desktop, Web e Mobile.
- **Integração entre diferentes dispositivos e protocolos:** permitindo integrar diferentes dispositivos e protocolos em um mesmo ambiente de maneira transparente e consistente, focando em padrões abertos e baseado em plataformas open source (hardware e software).
- **Utilização em dispositivos com limitações de processamento e memória:** oferecer soluções para o desenvolvimento de dispositivos embarcados com limitações de processamento e memória, como microcontroladores (AVR 8-bits), mini PCs e dispositivos móveis.
- **Oferecer um protocolo aberto e extensível:** Trata-se da elaboração de um protocolo (baseado em comandos), para integrar aplicações e dispositivos com limitações de memória e processamento, permitindo uma comunicação bidirecional, em tempo-real e apoiada sobre padrões abertos como MQTT, WebSocket, TCP, etc. Um dos principais objetivos é que este protocolo seja de fácil implementação e extensível.
- **Simplificação na criação de dispositivos inteligentes:** permitindo que as empresas e indivíduos possam focar em questões de projeto, design, marketing e

comercialização dos novos dispositivos inteligente que irão compor a Internet das Coisas.

- **Oferecer uma plataforma base para criação de projetos especializados:** através de uma arquitetura flexível, oferecer uma fundação para que empresas e desenvolvedores possam estender e adaptá-la a regras de casos de uso específicos das áreas de automação, transporte, cidades inteligentes, etc.

Neste contexto é apresentado o OpenDevice, um framework que facilita a criação de projetos de Internet das Coisas usando tecnologias de baixo custo, como: Arduino[8], Raspberry Pi[9], ESP8266[10] e outros[11, 12, 13].

## 1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho está organizado da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta os fundamentos para o desenvolvimento desta dissertação. O capítulo 3 apresenta e discute propostas e trabalhos relacionados com o desenvolvimento de middlewares ou projetos correlacionados. O capítulo 4 apresenta a arquitetura proposta e os seus componentes, assim como a implementação dessa arquitetura. O capítulo 5 apresenta a avaliação e os testes da implementação da proposta. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões da dissertação, assim como os trabalhos futuros.

# 2

## Fundamentação Teórica

### 2.1 Internet das Coisas

O termo Internet das Coisas (em inglês, Internet of Things - IoT), foi usado pela primeira vez em 1999 pelo pesquisador britânico Kevin Ashton[1]. O autor descreve a Internet das Coisas como um sistema através do qual os objetos do nosso cotidiano possam se conectar à internet usando sensores. Ashton aplicou esse termo para explicar o poder da conectividade das tags de rádio frequência identificada (RFID), usadas pelas grandes empresas para contagem de estoques sem a necessidade da interferência humana.

Em [14], os pesquisadores definem IoT como “uma rede de objetos interconectados, os quais poderiam possuir seu próprio endereço de IP, estar incorporados a sistemas complexos e usar sensores para monitorar o ambiente, respondendo a mudanças de contexto”. Tais pesquisadores ainda avaliam a Internet das Coisas em quatro aspectos. O primeiro é a possibilidade de seus sistemas conduzirem seus processos de forma independente da Internet atual. O segundo é que a IoT é construída em conjunto com novos serviços. O terceiro é que ela serve como ponte de comunicação não somente entre pessoas e objetos, mas também entre objetos e objetos (M2M ou Machine-to-Machine), e por último é que as redes podem ser abertas (públicas) ou fechadas (privadas ou restritas somente para alguns dispositivos).

A internet revolucionou a forma como as pessoas se comunicam em escala global, o próximo passo é intercomunicar as “coisas”. Os recentes avanços na tecnologia de sistemas micro-eleto-mecânicos nas comunicações sem fio e na eletrônica digital, possibilitaram a construção de microcontroladores e sensores de tamanho e custo reduzidos. A

proliferação destes dispositivos em uma rede de comunicação cria a chamada Internet das Coisas (IoT).

Na última edição do IoT World Forum, realizada de entre 6 e 8 de dezembro de 2015 em Dubai[15, 16, 17], foram divulgados alguns dados que demonstram o tamanho do crescimento da IoT. Entre eles:

- 58% das empresas do mercado dizem que IoT é estratégico para seu futuro (se tiver, uma referência mais específica);
- Atualmente o crescimento de sistemas de IoT tem dobrado ano a ano;

Crescimento da IoT entre 2013 e 2015:

- Sensores colocados no mercado: 10 bilhões em 2013 e 55 bilhões em 2015;
- Conexões de IoT: 11 bilhões em 2013 e 18 bilhões em 2015;
- Conexões M2M: 43 bilhões em 2013 e 73 bilhões em 2015;
- Empresas participantes em consórcios e associações da IoT: 44 em 2013 e 354 em 2015;

Investimentos:

- Desenvolvedores focados em IoT: 291 mil em 2013 e 813 mil em 2015;
- Startups em IoT: 127 em 2013 e 1.502 em 2015;
- Investimentos de Capital de Risco: US\$1,1 bilhão em 2013 e US\$ 2 bilhões em 2015;

Oportunidades:

- Receita gerada por IoT: US\$ 548 bilhões em 2013 e US\$ 780 bilhões em 2015;
- Receita de serviços de M2M: US\$ 79 bilhões em 2013 e US\$ 122 bilhões em 2015;
- “Coisas” não conectadas em 2013: 99,25% e em 2015 98,85%.

Previsão para o ano 2020:

- 50 bilhões de “coisas” conectadas;
- 6 dispositivos por pessoa;
- US\$ 11 trilhões de dólares em novos negócios.

Vários protocolos de aplicação divergentes têm sido propostos para Internet das Coisas, incluindo CoAP, REST, XMPP, AMQP, MQTT, DDS e outros. Cada protocolo incide sobre um aspecto específico das comunicações da Internet das Coisas. A falta de um protocolo que possa lidar com as exigências verticais de mercado de aplicações da Internet das Coisas, incluindo máquina-a-máquina, máquina-servidor, e comunicações de servidor para servidor resultou em uma fragmentação do mercado entre muitos protocolos. Por sua vez, esta fragmentação é um obstáculo principal no desenvolvimento de novos serviços que exigem a integração de múltiplos serviços da Internet das Coisas para desbloquear novas capacidades e proporcionar uma integração horizontal entre os serviços.

Diferentes organismos de normalização e grupos estão ativos na criação de pilhas de protocolo mais interoperáveis e de normas abertas para a Internet das Coisas. À medida que avançamos a partir do HTTP, TCP e IP para uma pilha de protocolos específicos para Internet das Coisas, eventualmente, nos deparamos com uma sopa de acrônimo de protocolos, de protocolos sem fio, como ZigBee, RFID, Bluetooth, e BACnet às normas de protocolo de última geração, tais como 802.15.4e, 6LoWPAN, RPL, e CoAP, que tentam unificar as redes de sensores sem fio e a Internet[18].

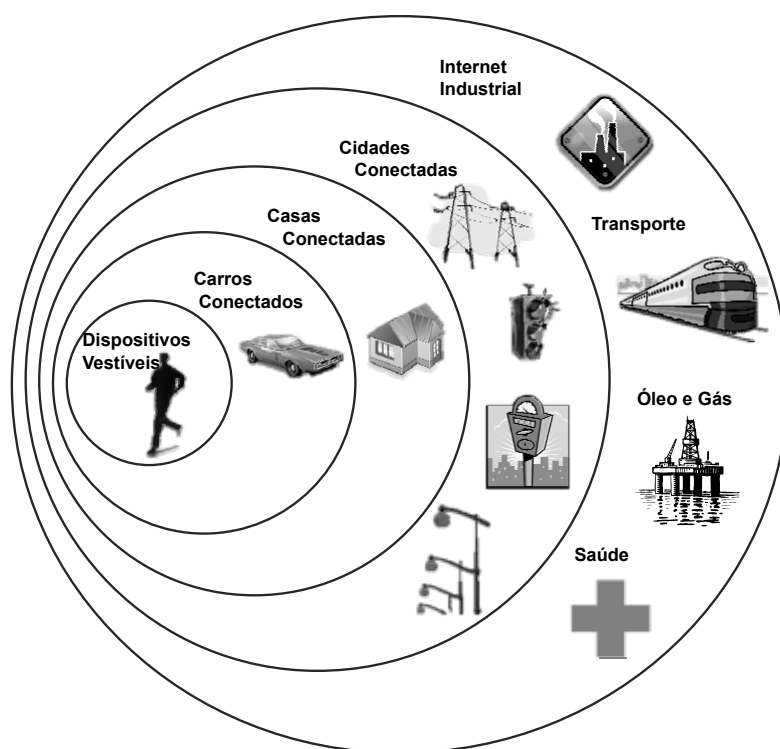
Por definição, a Internet das Coisas tem um enorme abrangência, que pode ser difícil de atender através de um única solução. A IoT pode ser dividida em cinco principais setores (Figura 2.1), que seriam as principais verticais de adoção da IoT[19]: dispositivos vestíveis (*Wearables*), carros conectados, casas conectadas, cidades conectadas e Industriais.

Na abertura do evento IoT Week 2013, Ashton afirmou que "A IoT é aqui e agora; não é o futuro, mas o presente"<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup><http://kevinjashton.com/2013/06/17/pre-recorded-opening-talk-for-internet-of-things-week-helsinki-june-17-2013/>





**Figura 2.1** Principais áreas de adoção (traduzido e adaptado de [19])

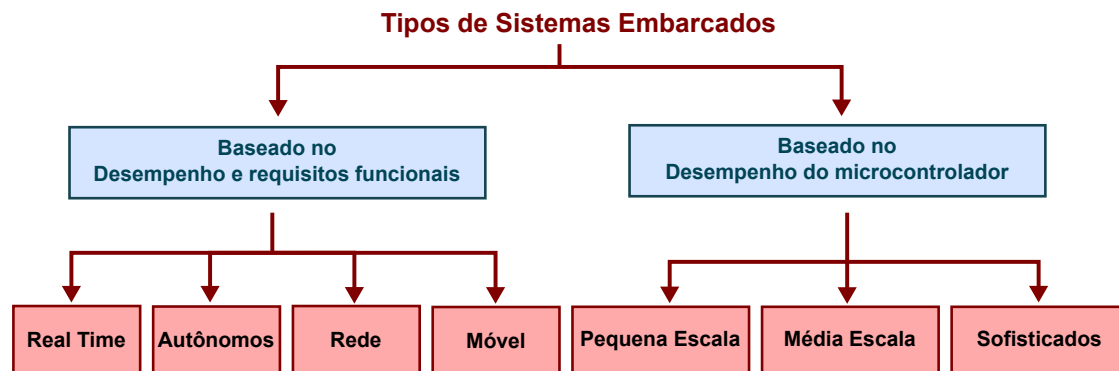
## 2.2 Sistemas Embarcados

Um sistema embarcado é uma combinação de hardware e software, projetados para executar uma função específica [20]. Como acontece com qualquer sistema eletrônico, este sistema requer uma plataforma de hardware construída com um microprocessador ou microcontrolador. O hardware do sistema embarcado inclui elementos como interface do usuário, interfaces de entrada/saída (I/O), display, memória, etc. Geralmente, um sistema embarcado é composto por um fonte de alimentação, processador, memória, temporizadores, portas de comunicação serial e circuitos específicos da aplicação do sistema.

Sistemas embarcados são mais limitados em hardware e software do que um computador pessoal (PC). Em termos de limitações de hardware, isto pode significar limitações no desempenho de processamento, o consumo de energia, memória, e assim por diante[20].

### 2.2.1 Tipos de Sistemas Embarcados

Sistemas embarcados podem ser classificados em diferentes tipos: com base no desempenho, requisitos funcionais e de desempenho do microcontrolador.



**Figura 2.2** Tipos de Sistemas Embarcados [21]

Sistemas embarcados são classificados em quatro categorias com base em seu desempenho e requisitos funcionais:

- Sistemas embarcados autônomos;
- Sistemas embarcados em tempo real;
- Sistemas embarcados em rede;
- Sistemas embarcados móveis.

Sistemas embarcados são classificados em três tipos, com base no desempenho do microcontrolador, tal como:

- Sistemas embarcados de pequena escala;
- Sistemas embarcados de média escala;
- Sistemas embarcados sofisticados.

Neste trabalho, abordaremos com mais ênfase os sistemas embarcados de pequena escala, compreendendo os microcontroladores, e os de média escala, compreendendo os mini PCs.

### 2.2.2 Microcontroladores

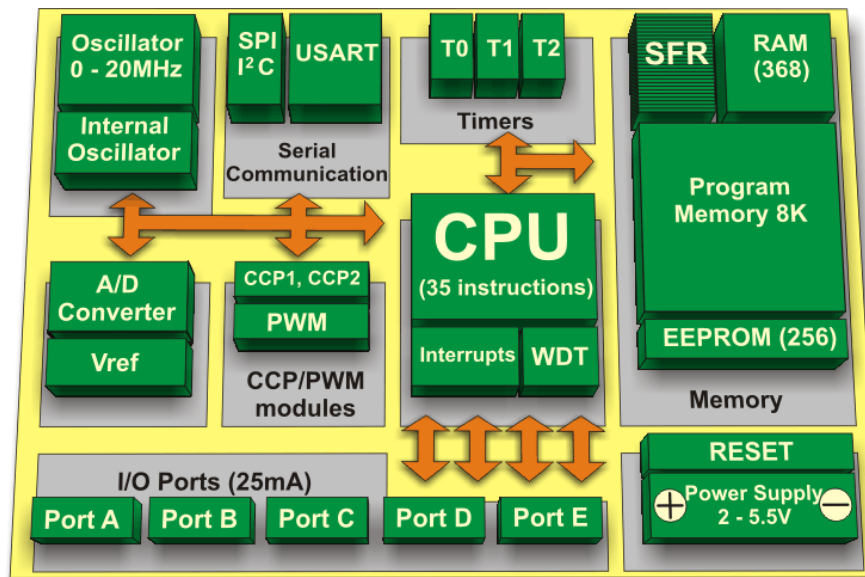
Um microcontrolador é um sistema computacional completo, no qual estão incluídos uma CPU (Central Processor Unit), memória de dados e programa, um sistema de clock, portas de entrada/saída (I/O), além de outros possíveis periféricos, tais como, módulos de temporização e conversores A/D entre outros, integrados em um mesmo componente[22].

Os sistemas micro-controlados estão presentes nas mais diversas áreas, dentre as quais estão a automação industrial, automação comercial, automação predial, área automobilística, agrícola, produtos manufaturados, eletrodomésticos, telecomunicações, etc. A Texas Instruments é creditada com a criação do primeiro microcontrolador, a série TMS1000. Os microcontroladores série TMS1000 tiveram bastante RAM, ROM e I/O e foram usados como controladores de forno de micro-ondas, em temporizadores industriais, e em calculadoras[23].

Em geral, os microcontroladores são projetados para serem fáceis de utilizar, do ponto de vista do projetista de circuitos. A Figura 2.3 representa o diagrama de blocos do que um microcontrolador típico, especialmente, os da série PIC. Um microcontrolador pode fazer interface com motores, displays, leitura de sensores externos, realizar a comunicação com um PC e mesmo se conectar a uma rede de controladores semelhantes, e pode fazer tudo isso sem uma quantidade excessiva de componentes. Isto leva a um pequeno e compacto sistema que é mais confiável e de baixo custo.

Em seguida, apresentamos os componentes do microcontrolador.

- **CPU:** A unidade central de processamento (CPU) é o coração do controlador. Ela obtém as instruções armazenadas na memória de programa, decodifica essas instruções, e executa. A CPU em si é composto de registradores, a unidade lógica aritmética (ALU), decodificador de instrução, e circuitos de controle.
- **Memória de Programa:** A memória de programa armazena as instruções que formam o programa. Para acomodar programas maiores, a memória de programa pode ser particionada como memória de programa interno e externo em alguns controladores. A memória de programa é geralmente não volátil e pode ser EPROM, EEPROM, Flash, Mask ROM ou OTP (one-time programmable).
- **RAM:** A memória RAM é a memória de dados do controlador, ou seja, ela é usada pelo controlador para armazenar dados. A CPU usa memória RAM para



**Figura 2.3** Diagrama de Blocos - PIC16F887 [24]

armazenar variáveis, bem como a pilha. A pilha é usada pelo processador para armazenar endereços de retorno a partir de onde pode retomar a execução depois de ter completado uma sub-rotina ou uma chamada de interrupção.

- **Oscilador e Clock:** O controlador executa o programa a uma determinada taxa. Esta velocidade é determinada pela frequência do oscilador. O oscilador pode ser um oscilador RC-interno ou um oscilador com um elemento de sincronismo externo, tal como um cristal de quartzo. Assim que a energia é aplicada ao controlador, o oscilador começa a funcionar.
- **Porta Serial:** Ela é usada para se comunicar com dispositivos externos através de uma comunicação serial, onde os dados são enviados ou recebidos em 1 bit de cada vez. A porta serial pode operar em qualquer velocidade de transferência, porém as mais usadas são 9800bps e 115200bps. As portas seriais são de dois tipos: síncronas e assíncronas. A transferência de dados síncrona precisa de um sinal de relógio (clock), para realizar a “sincronização” do envio dos bits de dados, enquanto a transferência de dados assíncrona não precisa do sinal do relógio, e a informação de sincronização está incorporado nos dados, utilizando bits de controle no início (START bit) e fim (STOP bit) do bloco de dados, que geralmente é de 8-bits. O bit START é sempre baixo (0), enquanto o bit STOP é sempre elevado (1).

- **Porta I/O Digital:** O microcontrolador usa os componentes de I/O (Entrada/Saída) digitais para a troca de dados digitais com o mundo exterior.
- **Porta I/O Analógica:** A entrada analógica é realizada utilizando um conversor analógico-digital (ADC). ADCs são usados para adquirir dados analógicos de dispositivos, como sensores de temperatura e sensores de pressão. A saída analógica é realizada utilizando um conversor digital-para-analógico (DAC). A maioria dos controladores estão equipados com moduladores de largura de pulso (PWM) que pode ser usado para obter uma tensão analógica.
- **Timer:** O *timer* é usado pelo controlador para execução de eventos baseados no tempo; por exemplo, realizar o controle de velocidade de um motor, o brilho de um LED ou gerar um pulso PWM. O *timer* também pode ser usado para contar os eventos externos, bem como internos, nesse caso, o temporizador é chamado um contador. A quantidade de *timers* disponíveis depende do microcontrolador usado.
- **Watchdog Timer:** O *watchdog timer* (WDT) é um temporizador especial, e geralmente é usado para prevenir falhas de software. Ele funciona da seguinte forma: Uma vez armado, se o programa de usuário não reiniciar o contador, notificando que tudo está certo, em um tempo máximo predefinido, o contador estoura, ocorrendo o reset do microcontrolador. A suposição é que, se o programa do usuário não repõe o WDT, ele falhou de alguma maneira e, portanto, em vez de uma falha no sistema ou manter um desempenho indesejado, é melhor reiniciar o sistema.

### Diferenças entre Microprocessador e Microcontrolador

Os termos microprocessador e microcontrolador, geralmente são confundidos um com o outro. Ambos foram concebidos para aplicação em tempo real. Eles compartilham muitas características comuns, ao mesmo tempo que têm diferenças significativas. Ambos podem não ser distinguidos apenas visualmente..

Microprocessador é um circuito integrado que tem apenas o CPU dentro dele, ou seja, apenas as capacidades de processamento, como Intel Pentium 4, Core 2 Duo, Core i5, i7 etc. Estes microprocessadores não tem RAM, ROM, e outros periféricos no chip. Um projetista do sistema tem que adicioná-los externamente para torná-los funcionais. Aplicação dos microprocessadores inclui Desktop PC de, Portáteis, notepads etc.

Microcontrolador tem uma CPU, além de uma quantia fixa (geralmente baixa) de

---

RAM, ROM e outros periféricos todos encaixados em um único chip. Às vezes, também é denominado como um computador em um único chip. Ele só pode executar uma aplicação (muitas vezes chamado firmware ou um aplicativo embarcado).

### 2.2.3 Mini PCs

Primeiramente, precisamos esclarecer que mini PCs não são os desktops comuns, que já estão no mercado há alguns anos com placas-mãe pequenas como micro ATX e flexATX. Estes, muito comuns em caixas de supermercado, por exemplo, são apenas versões um pouco reduzidas dos computadores comuns.

O tipo de máquina que estamos nos referindo são os credit-card sized SBCs (single-board computers ou computadores de placa única do tamanho de cartões de crédito). Além de serem super compactos, estes mini-pcs foram desenhados especificamente para serem flexíveis e fáceis de utilizar em projetos diversos por desenvolvedores, educadores e hobistas. Suas dimensões não ultrapassam os 8 ou 9 centímetros de lado e, como o nome já bem diz, possuem todos os seus componentes integrados em uma única placa de circuito. São também muito eficientes no consumo de energia, dispensando as complicadas e volumosas fontes dos PCs comuns e utilizando portas USB ou carregadores padrão para sua alimentação. Ainda assim, possuem opções de expansão e conectividade bem completas, como entrada e saída de áudio, cartão SD, portas USB, saída HDMI e rede ethernet.

Uma categoria específica de mini PCs, voltada para desenvolvimento de projetos embarcados, vem surgindo com o advento da Internet das Coisas. Os avanços na tecnologia não permitiram apenas a miniaturização dos computadores, permitiram também que seu custo fosse reduzido bastante. Uma máquina como o Raspberry Pi custa apenas \$35 dólares. Outro modelo, o BeagleBone Black custa a partir de \$45.

### 2.2.4 Linguagens de Programação

As linguagens de programação utilizadas em sistemas profundamente embarcados incluem C, C++, e algumas vezes Java. É importante notar que o Java é executado, na maioria das vezes, “em cima” de um sistema operacional, o que limita (mas não impede) sua execução em sistemas embarcados como microcontroladores. Java é atraente para os

dispositivos da Internet das Coisas, porque o número de desenvolvedores Java em todo o mundo traz enorme potencial de crescimento para a indústria. Oracle e ARM estimam que há cerca de 450 mil engenheiros de software embarcado em todo o mundo, e cerca de nove milhões de desenvolvedores Java[25].

## 2.3 Plataformas de Desenvolvimento

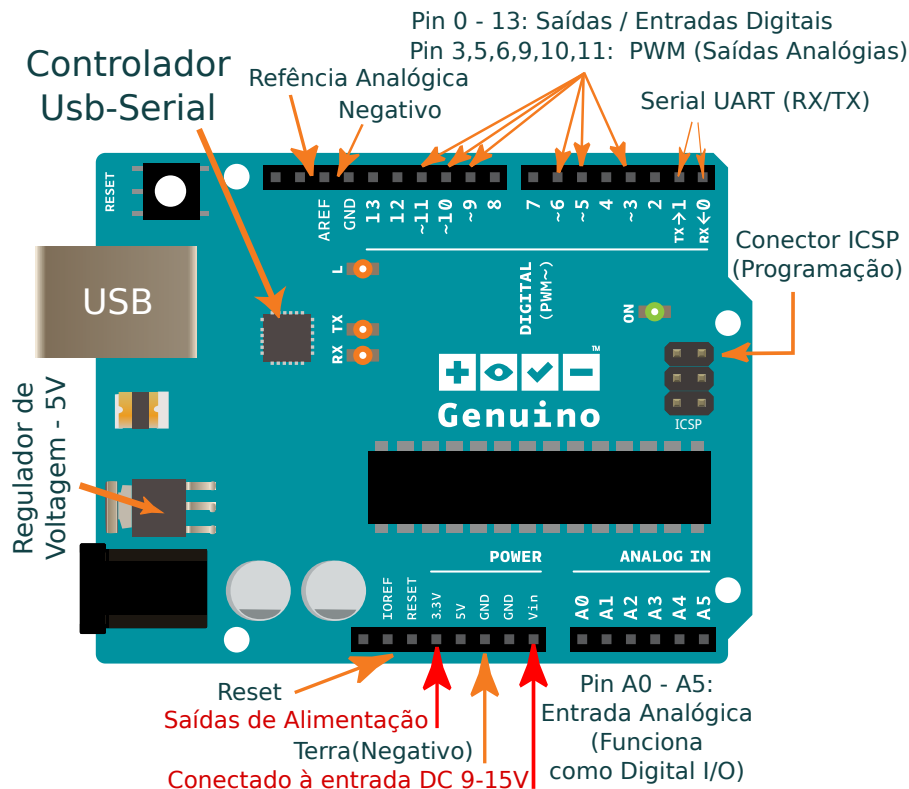
### 2.3.1 Arduino

Arduino[8] é uma plataforma de código aberto usada para a construção de projetos eletrônicos. Arduino consiste principalmente de uma placa de circuito físico programável (muitas vezes referida como um microcontrolador) e um pedaço de software, ou IDE (Integrated Development Environment), que é usada para escrever e fazer upload de código (firmware) para a placa física[8].

O Arduino tem o seu início no *Interaction Design Institute*, na cidade de Ivrea, Itália, em 2005. O Professor Massimo Banzi estava procurando uma maneira mais fácil e de baixo custo para ensinar os estudantes de design a trabalhar com tecnologia. Ele discutiu o problema com David Cuartielles, pesquisador visitante da Universidade de Malmö, na Suécia, que estava à procura de uma solução semelhante, e o Arduino nasceu[26]. O conceito Arduino de hardware aberto foi desenvolvido pela equipe visionária de Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, e David Mellis[27].

Quando a maioria das pessoas pensam em Arduino, eles imaginam a pequena, retangular (e provavelmente azul), placa de circuito impresso (PCB), que é a parte fisicamente tangível do sistema Arduino. Tecnicamente falando, o termo Arduino abrange o hardware, software, equipe de desenvolvimento, a filosofia de design, e a comunidade de usuários. A Figura 2.4, apresenta a placa Arduino, bem como, destaca seus principais componentes.

O Arduino foi originado do projeto Wiring[28], que foi em si um ambiente de desenvolvimento de sistemas embarcados baseados em AVR com uma IDE especializada escrita em Java. O Wiring, por sua vez, foi originado do Processing[29], outra coleção de ferramentas de código aberto para escrever programas interativos orientados a gráficos.



**Figura 2.4** Placa Arduino (traduzido e adaptado de[30])

### Características de Hardware

O Arduino pode ser encontrado em várias versões, a maioria das placas são baseadas no microcontrolador Atmel AVR de 8 bits. A primeira placa foi baseada na ATmega8 rodando a uma velocidade de clock de 16 MHz com 8 KB de memória flash[26]. Uma das placas mais populares é o Arduino Uno<sup>2</sup>, que utiliza o ATmega328p, com memória flash de 32KB e 2 KB de memória RAM. Nos projetos mais exigentes, que requerem mais I/O e memória, há o Arduino Mega 2560 com 256 KB de memória ou o Arduino Due<sup>3</sup>, baseado no Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, com 512KB de memória flash e 96 KB de memória RAM.

As placas mais populares, em específico o Uno, têm 14 pinos digitais, cada um dos quais podem ser definidos como entrada (input) ou saída (output), e seis entradas analógicas. Além disso, seis dos pinos digitais podem ser programados para proporcionar uma saída analógica PWM (Pulse Width Modulation). Uma variedade de protocolos

<sup>2</sup>Arduino UNO (nos Estados Unidos) e Genuino UNO (fora dos Estados Unidos)

<sup>3</sup><https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>



de comunicação estão disponíveis, incluindo Serial, SPI (Serial Peripheral Interface), e I2C (Inter-integrated Circuit Protocol). Na placa também é disponibilizada uma entrada ICSP, que permite a programação do microcontrolador (que é também realizada pela porta USB) e um botão de reset.

Placas especializadas chamado *Shields*, são usadas expandir as funcionalidade do Arduino. Estas podem ser empilhadas uma em cima da outra para adicionar ainda mais funcionalidade, sendo esta, uma das principais facilidades e fator de sucesso da plataforma Arduino.

### Características de Software

Embora, muitas vezes o Arduino seja apresentado como uma linguagem, na perspectiva de software, ele é na verdade um conjunto de bibliotecas e APIs construídas em C/C++, que são baseadas nas APIs do projeto Wiring.

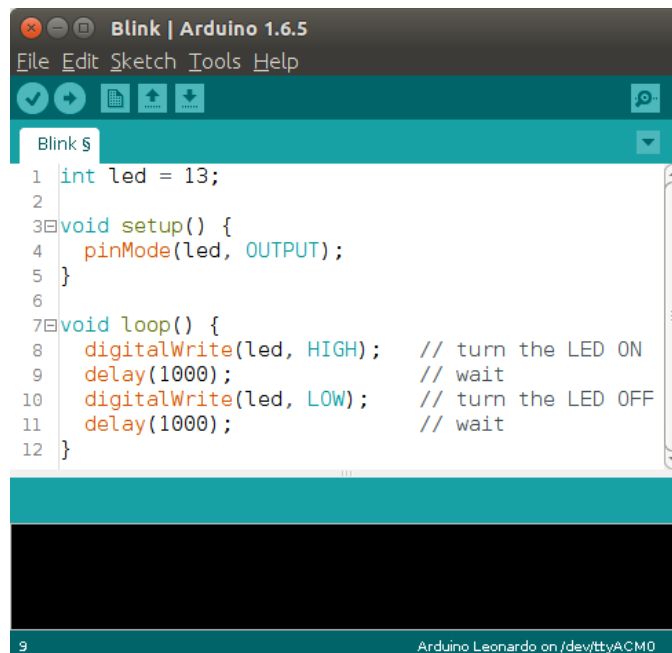
A programação do Arduino é realizada por uma IDE (Integrated Development Environment), escrita em Java e de código aberto[31], que fornece tudo que é necessário para a programação do Arduino, incluindo uma série de programas de exemplo (sketches) que demonstram como conectá-lo e se comunicar com alguns dispositivos comuns, como LEDs, LCDs, e alguns sensores.

A IDE do Arduino usa uma versão simplificada do C++[32], tornando mais fácil aprender a programar e realizar interações com o hardware. A estrutura básica de um programa para o Arduino é apresentado na figura 2.5. Programas escritos usando a IDE do Arduino são chamados de sketches.

### 2.3.2 Raspberry Pi

O Raspberry Pi[9] é um mini PC de baixo custo, do tamanho de um cartão de crédito, que possui recursos consideráveis de processamento e memória. Ele foi desenvolvido no Reino Unido, com intuito de fomentar a educação para adultos e crianças e logo se destacou na comunidade de desenvolvedores antes mesmo do seu lançamento oficial em junho de 2012.

O equipamento usa como seu Sistema Operacional (S.O), a distribuição Raspbian Wheezy, que é baseada no Linux Debian. Porém, existem inúmeros Sistemas Operacio-



**Figura 2.5** IDE do Arduino

nais compatíveis[33], incluindo o Windows 10 IoT Core[34].

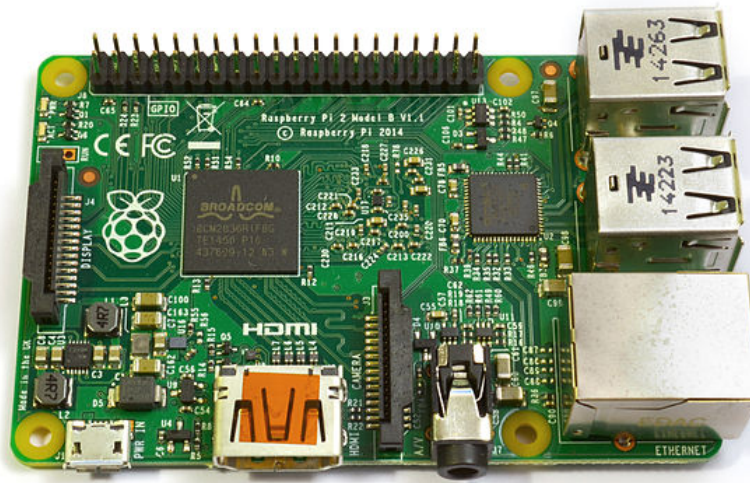
### Características de Hardware

Existem diferentes modelos, que contemplam diferentes características técnicas. O Raspberry Pi 2 Model B (Figura 2.6)<sup>4</sup>, possui um processador com arquitetura ARM, 900MHz de velocidade (permitindo overclock) e 1GB de memória RAM. O processador é o BCM 2835, o mesmo usado no iPhone 3g e Kindle 2.

### Especificações:

- SoC: Broadcom BCM2836 (CPU, GPU, DSP, SDRAM);
- Processador: 900 MHz quad-core ARM Cortex A7 (ARMv7)
- GPU: VideoCore IV @ 250 MHz / OpenGL ES 2.0 (24 GFLOPS);
- Memória: 1GB MB (compartilhada com a GPU);

<sup>4</sup>ref:<https://www.raspberrypi.org/products/model-b-plus/>



**Figura 2.6** Raspberry Pi 2 - Model B [35]

- Saídas de Vídeo:
  - Vídeo Composto (PAL e NTSC) através de conector P2 com saída de áudio integrada;
  - HDMI (ver 1.3 e 1.4);
  - Interface MIPI para ligar diretamente a painéis LCD.
- Saídas de Áudio: Saída de áudio analógica através de conector P2 compartilhada com o vídeo composto / HDMI;
- Interfaces:
  - 4 x portas USB 2.0;
  - 1 x MicroUSB (Alimentação);
  - 1 x Entrada MicroSD;
  - 1 x Ethernet (10/100Mbps);
  - 1 x GPIO (40 pinos) (General Purpose Input/Output).

### Características de Software

Devido ao Raspberry Pi utilizar um S.O baseado em Linux e arquitetura ARM, inúmeras linguagens de programação são suportadas[36], por exemplo, Java, JavaScript, PHP, Python, Ruby, etc. Bem como, é possível executar servidores como Apache, Nginx e MySQL.

A distribuição oficial, Raspbian[37], vem com suporte nativo a Python e Java. A versão do Java instalada é a 'jdk-8-oracle-arm-vfp-hflt', fornecida pela Oracle. É possível, contruir aplicações gráficas utilizando *JavaFX*[38], tornando o Raspberry Pi, um potencial equipamento para criação de inúmeras aplicações embarcadas.

Para controlar os pinos de GPIO em aplicações Java, existem várias formas. Infelizmente a versão instalada não possui o suporte nativo a este recurso (algo contraditório). Uma recente especificação, denomina *Device I/O*[39], foi projetada para acessar os periféricos dos sistemas embarcados, permitindo acesso a recursos como GPIO, I2C, SPI, UART, PWM, etc.

Para utilizar a API *Device I/O*, é necessário instalar a versão *Java ME Embedded*[39], que conta com todos componentes necessários. Porém, é possível utilizar API *Device I/O* com a versão do Java instalada por padrão no Raspberry Pi, necessitando, neste caso, realizar a compilação da mesma.

Outra alternativa, é utilizar a biblioteca Pi4J[40], que permite realizar o acesso aos periféricos, utilizando uma API Java totalmente orientada a objetos.

### 2.3.3 BeagleBone

A BeagleBone[41] é outra plataforma na categoria de mini PC, que se propõe a ser um computador de baixo custo, projetado para fins educacionais. Ela foi projetado pela Texas Instruments, e é totalmente open source, tanto em hardware quanto em software.

O equipamento usa como seu Sistema Operacional (S.O), a distribuição Angstrom Linux, porém oferece suporte a outras versões do Linux, incluindo, Debian, Ubuntu e Android.

### Características de Hardware

Existem diferentes modelos, que contemplam diferentes características técnicas. A BeagleBone Black (Figura 2.7), possui um processador AM3358BZCZ100, arquitetura ARM, 1Ghz de velocidade e 512MB de memória RAM. Outros modelos podem chegar até 2GB de RAM.

Um dos diferenciais em relação ao Raspberry Pi, é que ela possui uma memória flash (eMMC) embutida de 4GB, onde é armazenado o Sistema Operacional, o que permite um tempo carregamento do S.O menor (10s), e maior confiabilidade do que o cartão MicroSD, utilizado no Raspberry Pi.

Ao plugar a placa na porta USB do computador, ela é reconhecida como um driver virtual de rede e pode ser acessada através do IP fixo '*http://192.168.7.2*'.

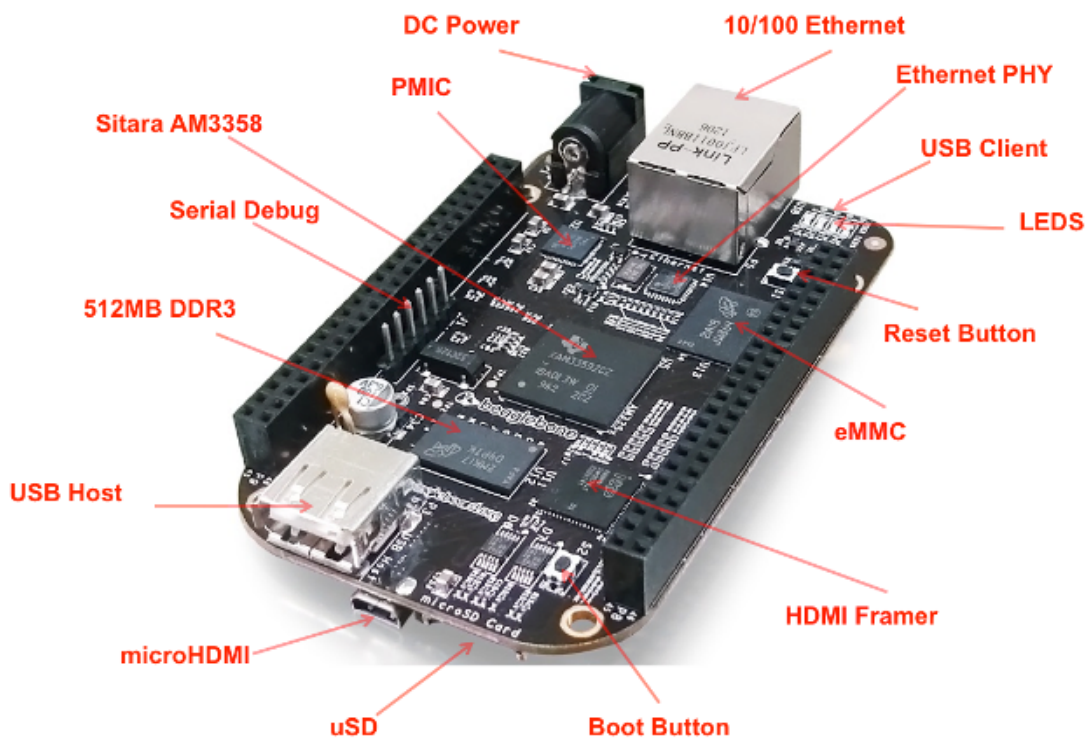


Figura 2.7 BeagleBone Black [42]

### Especificações:

- Processador: TI Sitara™ AM3358 ARM® Cortex™-A8

- GPU: Suporte a aceleração gráfica 3D;
- Memória: 512MB DDR3;
- Armazenamento: 4GB 8-bit eMMC Onboard Flash;
- Saídas de Vídeo: Micro HDMI;
- Saídas de Áudio: Micro HDMI;
- Interfaces:
  - 1 x portas USB 2.0;
  - 1 x MicroUSB (Alimentação e Comunicação);
  - 1 x Entrada MicroSD;
  - 1 x Ethernet;
  - 2 x GPIO (46 pinos) (General Purpose Input/Output).

### Características de Software

Devido ao S.O ser baseado em Linux, as principais linguagens de programação são suportadas. A distribuição oficial, Angstrom, vem como uma IDE Web (baseada na Cloud9 IDE<sup>5</sup> e Node.JS), que permite executar programas em JavaScript utilizando Node.js e a biblioteca BoneScript. A biblioteca BoneScript, permite o acesso aos periféricos e pinos de GPIO da placa, possui uma sintaxe simples, com algumas funções similares ao Arduino.

O desenvolvimento de aplicações usando Java é suportado, porém, é necessário instalar o Java JDK 1.8 SE para plataforma ARM. Infelizmente, não está disponível até o momento, a versão *Java ME Embedded* para a BeagleBone, que oferece suporte a API *Device I/O*. A alternativa, neste caso, é compilar a biblioteca. Apesar do site do projeto *Device I/O*, não mencionar a compatibilidade com a esta placa, nos testes efetuados, a compilação foi realizada com sucesso e o acesso aos pinos GPIO pode ser realizado através do Java.

Outra alternativa, é utilizar a biblioteca “libbulldog”[43], que permite realizar o acesso aos periféricos, utilizando uma API Java totalmente orientada a objetos.

---

<sup>5</sup><https://c9.io/>

### 2.3.4 ESP8266

O ESP8266[10][44] é um SoC (System on a Chip), altamente integrado, projetado para as necessidades de um mundo cada vez mais conectado. Ele oferece uma solução completa e independente de rede Wi-Fi, permitindo rodar aplicações embarcadas ou fornecer as funções de rede Wi-Fi para outros microcontroladores, através de uma comunicação serial UART. O ESP8266 tem poderosas capacidades de processamento e armazenamento que permitem que ele seja usado com sensores e outros dispositivos através de suas interfaces de GPIO (General Purpose Input/Output). Seu alto grau de integração “*on-chip*”, permite a simplificação dos projetos de circuitos. Toda a solução, incluindo o módulo, está concebido para ocupar uma área mínima de PCB (Printed Circuit Board). Um dos principais atrativos e fatores de sucesso, é seu baixíssimo custo<sup>6</sup> e a facilidade com que o mesmo pode ser integrado a demais soluções, tornando-se uma das plataformas mais populares de desenvolvimento nos últimos anos.

#### Características de Hardware

O ESP8266 (Figura 2.8b) foi desenvolvido pela *Espressif Systems*, como uma interface Serial (UART) para Wi-Fi, usando o microcontrolador *Tensilica Xtensa LX3* de 32-bits, com clock de 80MHz, 32KB RAM (instrução) e 96KB RAM (dados). O núcleo da CPU é baseado no Xtensa[45], da Cadence.

Os módulos ESP8266 são fornecidos numa ampla variedade de modelos, com diferenças perceptíveis principalmente no que tange à quantidade de pinos I/O disponíveis para acesso externo, e no tamanho do módulo. Até o presente momento, "oficialmente" existem módulos numerados de ESP-01 até ESP-12[46]. A Figura 2.8a, apresenta o módulo ESP-01.

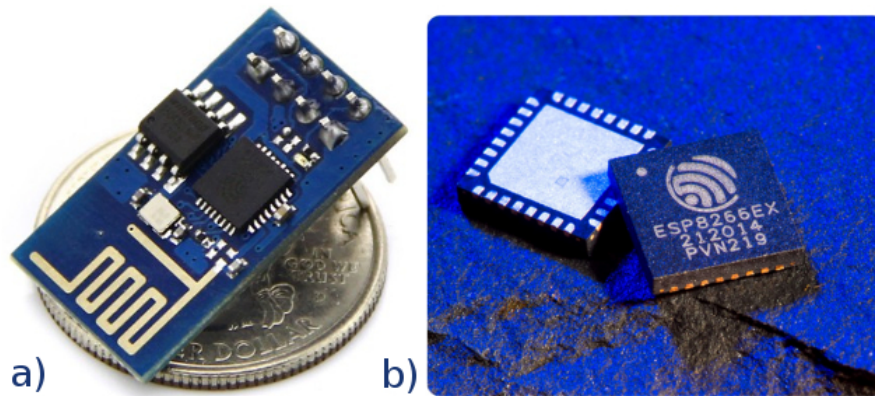
#### Algumas características do módulo Wireless ESP8266:

- Conexão à redes padrão 802.11 B/G/N;
- CPU que opera em 80MHz, com possibilidade de operar em 160MHz;
- Pilha TCP/IP integrada;

---

<sup>6</sup><https://www.sparkfun.com/products/13678>





**Figura 2.8** Módulo ESP-01 (a), Chip ESP8266 (b), adaptado de [10].

- Tensão de operação : 3.3 V;
- Tem conectores GPIO, barramentos I2C, SPI, UART, entrada ADC, saída PWM e sensor interno de temperatura;
- Suporte a memória Flash Externa - 512 KB até 16MB;
- Modos de operação : Cliente, Access Point, Cliente+Access Point;
- Modos de segurança Wireless : OPEN/WEP/WPA\_PSK/WPA2\_PSK/WPA\_WPA2\_PSK;
- Suporta comunicação TCP e UDP, com até 5 conexões simultâneas.

### Características de Software

A Espressif disponibiliza um SDK completo para trabalhar com o ESP8266[47]. No SDK são disponibilizados recursos para suporte à SSL, JSON, e a biblioteca lwIP<sup>7</sup>, tornando esta uma solução bastante completa para criação de projetos para a Internet das Coisas. A empresa possui um repositório no GitHub[48], onde disponibiliza exemplos de código para firmwares com RTOS e comandos AT.

Alguns dos módulos vêm pré-carregados com um firmware que os transformam em "Pontes Serial-WiFi", permitindo serem configurados e controlados por outros microcontroladores (ex.: Arduino). Para realizar essa ponte, a interface serial dos módulos obedece a uma tabela de comandos, que seguem o padrão AT, que podem variar de acordo com a versão do firmware.

---

<sup>7</sup><http://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>



Um dos firmwares mais populares é o NodeMCU[49], que permite programar o módulo usando a linguagem de programação LUA, tornando prático, por exemplo, a criação de um servidor Web com acionamento de GPIOs. Existe também a possibilidade de programar o ESP8266 usando JavaScript, através do firmware Espruino[50], porém ainda em versão Beta.

Outra opção disponível, é programar o ESP8266 utilizando as APIs do Arduino. A IDE do Arduino oferece suporte para o ESP8266, permitindo utilizá-lo como se fosse um Arduino. O núcleo ESP8266 para Arduino[51] vem com bibliotecas para se comunicar através do Wi-Fi, usando servidores TCP e UDP, configurar servidores HTTP, mDNS, e fazer atualizações remotas. Permite também utilizar o sistema de arquivos em memória flash ou cartões SD e realizar comunicação usando protocolos UART, SPI e I2C.

## 2.4 Rede de Sensores Sem Fio (RSSF)

A combinação de sensoriamento, processamento e comunicação de interface, oferta milhares de aplicações potenciais que é o conceito principal de rede de sensores sem fio[52]. Os nós de sensores sem fio são unidades auto-suficientes que consistem em uma fonte de energia, capacidades de comunicação, poder de computação e um atuador ou sensor. Eles podem se comunicar entre si, coletar dados do ambiente ao redor ou se conectar a uma estação base externa ou centro de controle remoto[53].

Os recentes avanços tecnológicos em circuitos integrados de baixa potência e comunicações sem fio, permitiram a criação de dispositivos cada vez menores, com baixo consumo de energia e com baixo custo, tornando-se soluções eficientes para uso em aplicações de sensoriamento remoto. A combinação desses fatores melhorou a viabilidade de utilizar uma rede de sensores composta por um grande número de sensores inteligentes, permitindo a coleta, tratamento, análise e disseminação de informações valiosas[54].

RSSFs em geral caracterizam-se por possuir uma alta densidade de nós. Vários sensores monitoram o mesmo fenômeno, gerando dados redundantes e, muitas vezes, fornecendo à aplicação um nível de qualidade maior do que o necessário. Como a maior fonte de consumo de energia nos sensores é a transmissão de dados, grande parte dos esforços de pesquisa em RSSFs visa propor soluções para obter e rotear os dados de forma eficiente em energia, a fim de estender o tempo de vida global da rede. Por um lado, há propostas cujo enfoque é minimizar o número de transmissões e/ou o tamanho

das mensagens, realizando o roteamento eficiente em energia[55, 56]. Por outro lado, pesquisas recentes[57, 58], mostram que, em vez de fornecer uma redundância de dados desnecessária para a aplicação, a alta densidade de nós pode ser aproveitada para obter significativa economia de energia. Vários métodos podem ser empregados a fim de se obter essa economia.

A seguir estão algumas propriedades de redes de sensores sem fio:

- **Auto-organização:** Os nós de sensores podem criar automaticamente a rede e a posição dos nós não precisam ser pré-determinada. Uma rede de sensores auto-organizáveis não tem nenhuma necessidade de se ligar a uma rede estabelecida.
- **Comunicação de curto alcance e encaminhamento multi-salto:** Comunicação multi-salto em redes de sensores sem fio é esperada para consumir menos energia do que a comunicação tradicional de salto único. Como sabemos, a potência de transmissão requerida aumenta com a distância entre o transmissor e o receptor. Consequentemente, muitos pequenos saltos requerem menos energia do que um longo salto.
- **Cooperação entre nós:** Por causa dos recursos limitados dos nós, papéis diferentes são atribuídos para nós na rede para alcançar uma rede de baixa potência.
- **Topologia Dinâmica:** Na rede de sensores sem fio, nós podem falhar e ficar *off-line*<sup>8</sup> ou novos nós podem ser adicionados na rede. Assim, a topologia da rede opera de forma dinâmica.
- **Recursos energéticos limitados, poder computacional e memória:** Uma vez que uma rede de sensores sem fio é composta por pequenos dispositivos, a rede sofre com limitações de recursos, por exemplo energia, poder computacional e memória.

É geralmente reconhecido que os sensores e redes de sensores serão uma parte significativa da IoT [59]. Os sensores podem monitorar o mundo físico por detectar e medir diferentes tipos de informações ambientais. Ao alimentar aplicações adequadas com esse tipo de informação através de vários tipos de objetos do mundo físico, a Internet passaria de "computadores interligados" para "as coisas interligadas." Redes inteligentes sensíveis ao contexto estão se aproximando rapidamente da posição de sistemas de rede integrados,

---

<sup>8</sup>fora de operação

onde o desenvolvimento de minúsculos sensores e atuadores pode perfeitamente realizar tais redes em grandes ambientes de fábrica, redes para automóveis, residências, escritórios inteligentes e serviços de apoio social, incluindo os alertas sísmicos, monitoramento de pacientes e sensíveis ao contexto em situações de emergência [59].

## 2.5 RFID

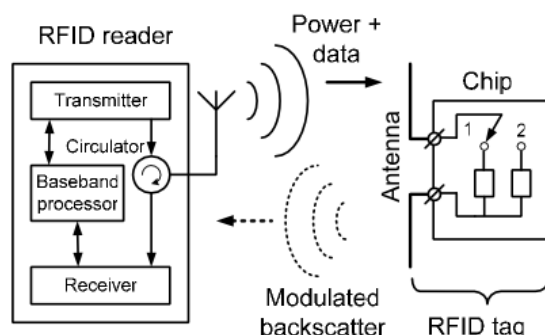
O RFID - *Radio Frequency Identification*, ou, em tradução livre, Identificação por Radio-frequência, não é uma tecnologia nova, ela teve seu início com o físico escocês Sir Robert Alexander Watson-Watt em meados de 1937[60]. Esta tecnologia foi primeiramente usada em sistemas de radares na Segunda Guerra Mundial para avisar com antecedência a presença dos aviões aliados ou inimigos e que permaneceu restrito somente para uso militar até os anos 70. C.M Roberts, em [61], descreve essa tecnologia como um “sistema de transação e identificação de dados por proximidade eletromagnética”. O autor também afirma que o RFID é um melhoria sobre os códigos de barras em termos de comunicação por proximidade não ótica.

Um sistema RFID consiste em leitores (também chamados de interrogadores) e etiquetas (ou *transponders*). Um sistema típico, tem alguns leitores, estacionários ou móveis e muitas etiquetas que estão ligadas a objetos, tais como livros, caixas de papelão, garrafas, etc[62]. Um leitor se comunica com as etiquetas sem utilizar fios, dentro do seu campo de atuação, e coleta informações sobre os objetos aos quais as etiquetas estão associadas. Dependendo do seu princípio de funcionamento, as etiquetas são classificadas em três categorias: passivas, semi-passiva e ativa.

A etiqueta passiva é a menos complexa e, portanto, a mais barata. Não tem nenhuma fonte de alimentação interna, e usa o campo eletromagnético transmitido por um leitor para alimentar seu circuito interno. Ela não se baseia em um transmissor, mas em "retrodifusão" para transmitir dados de volta para o leitor. A etiqueta semi-passiva tem fonte de energia própria, mas nenhum transmissor, usando o mecanismo de "retrodifusão". Uma etiqueta ativa, tem tanto fonte de alimentação interna quando transmissor[62].

A figura 2.9 ilustra o funcionamento do sistema RFID passivo que consiste de uma etiqueta RFID e uma estação de base chamado "leitor RFID". Uma etiqueta passiva consiste em uma antena e um circuito integrado de aplicação específica (ASIC), ambos com impedâncias complexas. O chip obtém energia a partir do sinal de RF transmitido

pelo leitor RFID. A etiqueta envia dados de volta ao mudar a sua impedância de entrada entre dois estados e modulando assim o sinal por "retrodifusão".



**Figura 2.9** Visão geral do RFID passivo [62]

Atualmente, o RFID tem uma gama enorme de aplicabilidade, que vão desde os conhecidos cartões de acesso residenciais por proximidade até ao rastreamento em cadeias de produção, controle estacionamento de veículos, gerenciamento de estoque, rastreamento de livros, prevenção de roubos, etc[61].

Esta tecnologia tem se difundido rapidamente pelo mundo, por sua facilidade de uso e também pelo fato de dispensar a intervenção humana[63]. no mundo dos negócios o RFID tem recebido grande expectativas com previsão de crescimento de US\$ 4,96 bilhões em 2007 e US\$ 26,88 bilhões em 2017[64].

O RFID possibilitou a inserção de inteligência nos objetivos, trazendo aos mesmos a capacidade de comunicarem-se de forma automática[65]. Em [65], o autor afirma que o RFID representa uma tecnologia que possibilitou a convergência entre computação, comunicação e interação através de redes sem fio, sensores e a grande rede de computadores. Em complemento o autor afirma que esta tecnologia tem o potencial que permite a máquina identificar objetos, compreender seus estados e tomar medidas, se necessário. Ou seja, possibilitou aos objetos do nosso cotidiano de pensar e interagir. Todo esse desenvolvimento contribuiu com a criação da Internet das Coisas (IoT), que permite a interação inteligente entre objetos ao redor do mundo. As soluções categorizadas de acordo com o domínio de redes de sensores e a tecnologia RFID têm abordado de forma eficiente problemas relacionados a interoperabilidade, escalabilidade, infraestrutura distribuída, interação espontânea[59].

## 2.6 Tecnologias de Comunicação

A Internet das Coisas necessita de tecnologias de comunicação na camada física e do middleware para fornecer o controle dos dispositivos para a camada das aplicações. Tipicamente, os meios físicos de comunicação entre os dispositivos são baseados em três grupos diferentes: cabeamento estruturado, a fiação existente, e sem fio[66].

Na maioria dos casos, os dispositivos usam a comunicação sem fio porque os padrões de tecnologia sem fio estão em toda parte. A ampla disseminação de redes sem fio em nossa vida diária está habilitado para os padrões de comunicação, como Bluetooth, Zigbee, RFID, Wi-Fi e redes móveis (3G/4G). Prevê-se uma combinação destas normas e tecnologias, afim de construir ambientes inteligentes. Efetivamente, todas as tecnologias sem fio que podem apoiar de alguma forma a transferência de dados remotos, detecção e controle, são candidatas para inclusão no ambiente de IoT.

### 2.6.1 Tecnologias não IP

#### ZigBee

ZigBee é uma tecnologia de rede sem fio desenvolvida pela ZigBee Alliance para aplicações de baixa taxa de transmissão de dados e de curto alcance[67]. É uma especificação para um conjunto de rede, segurança, e camadas de software de aplicações baseado no padrão IEEE 802.15.4 para redes de área pessoal (PAN)[68].

A pilha do protocolo ZigBee é composta de quatro camadas principais: a camada física (PHY), a camada de controle de acesso ao meio (MAC), a camada de rede (NWK), e a camada de aplicação (APL). PHY e MAC de ZigBee são definidos pela norma IEEE 802.15.4, enquanto o resto da pilha é definido pela especificação ZigBee.

ZigBee é especialmente adequado para aplicações em sensores, incluindo automação predial, interruptores de luz sem fio, medidores elétricos e sistemas de gestão de tráfego. Em geral, é indicado para aplicações em que altas taxas de transferências de dados não são requeridas. A versão inicial do IEEE 802.15.4, em que ZigBee é baseado, atua nas frequências de 868MHz, 915 MHz e 2,4 GHz, que estão disponíveis na Europa, América do Norte e em todo o mundo, respectivamente. As taxas de dados são 20 kb/s, 40kb/s, e 250kb/s, respectivamente[69].

Os perfis de aplicações ZigBee mais importantes são o *ZigBee Home Automation Public Application Profile* [67], e do *ZigBee Smart Energy Profile* [70]. As principais áreas de aplicação para o perfil *Home Automation* são de iluminação, controle de temperatura, e segurança. O perfil *Smart Energy* lida com aplicações de gerenciamento de demanda de energia e de gestão de carga para as redes de energia.

### Bluetooth

Bluetooth, definido pela norma IEEE 802.15.1 [71] foi inventado pelo provedor de telecomunicações Ericsson em 1994, e foi originalmente concebido como uma alternativa sem fios para a comunicação por fios RS-232. É um protocolo projetado principalmente para baixo consumo de energia com um curto alcance. Opera mundialmente através de uma banda de frequência não licenciada (ISM) em 2.4 GHz (2400-2483,5 MHz), com taxas de transmissão de 1 Mbit/s [72]. A figura 2.10 apresenta a pilha do protocolo Bluetooth.

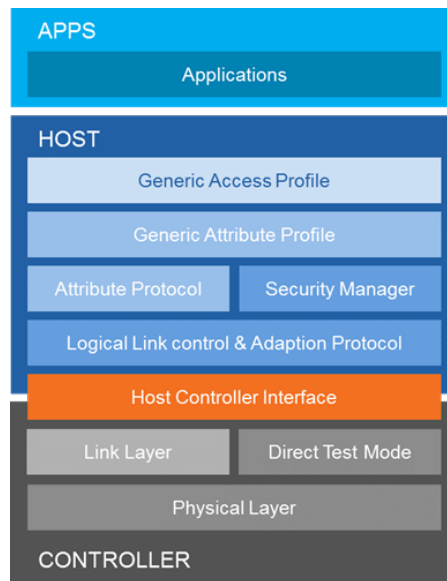
O sistema Bluetooth provê conexões ponto-a-ponto (apenas dois dispositivos Bluetooth envolvidos), ou conexões ponto-multiponto. Nas conexões ponto-multiponto, o canal é compartilhado entre alguns dispositivos Bluetooth, formando uma piconet. Em uma piconet, um dos dispositivos Bluetooth funciona como master (mestre), enquanto os demais funcionam como slaves (escravos). O master controla o acesso dos dispositivos slaves, determina o clock responsável pela sincronização, dentre outras funções.

A figura 2.11 apresenta alguns exemplos de topologias possíveis. Em 2.10a, tem-se uma piconet com um único escravo. Em 2.10b, tem-se uma piconet com múltiplos escravos. Em 2.10c, tem-se uma possível configuração de uma scatternet [73].

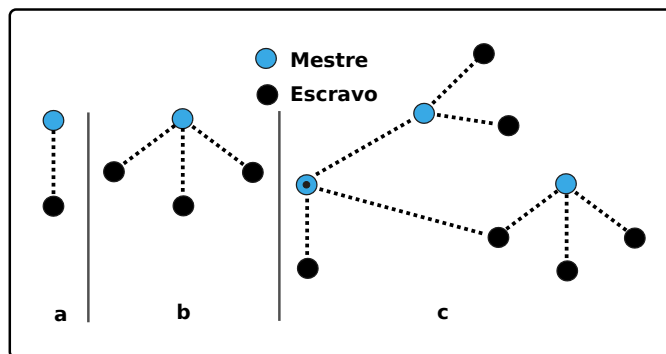
Bluetooth suporta ligações síncronas e assíncronas. O link síncrono orientado a conexão (SCO) é usado principalmente para voz e eles são transmitidos através de intervalos reservados. O link para conexão assíncrona (ACL) é usado principalmente para transmissão dados. Ligação ACL pode utilizar as faixas restantes no canal. Ao contrário de SCO, para garantir a integridade de dados, no ACL pacotes são retransmitidos.

Existem três diferentes classes de dispositivos Bluetooth. Cada classe tem uma potência de transmissão diferente (daí um alcance de transmissão diferente) [74]:

- Classe 1: O alcance de comunicação é de 100 metros e a potência de transmissão é de 100 mW (20 dBm)



**Figura 2.10** Pilha do protocolo Bluetooth [74]



**Figura 2.11** Topologias de redes Bluetooth (traduzido de [73])

- Classe 2: O alcance de comunicação é de 50 metros e a potência de transmissão é de 2,5 mW (4 dBm)
- Classe 3: O alcance de comunicação é de 10 metros e a potência de transmissão é de 1 mW (0 dBm)

### Bluetooth LE (Low Energy)

Bluetooth *Low Energy*, definido em *Bluetooth Core Spec 4.0* [75] e suas derivações 4.1 e 4.2, é um protocolo sem fio operando na banda não licenciada de 2,4 GHz. Enquanto ela opera na mesma faixa de frequência que outras tecnologias Bluetooth, a sua operação nas

camadas físicas (PHY) é incompatível, necessitando de dispositivos com chipsets operem nos dois modos (Dual-mode)[75]. A camada PHY BT.LE usa *Gaussian Frequency Shift Keying* (FSK) com um deslocamento de 250 kHz. Ele transmite em um dos 40 canais em 1 Mbit/s.

Segundo a Bluetooth SIG (Special Interest Group), o Bluetooth LE, destaca-se como uma importante tecnologia para a Internet das Coisas:

Bluetooth 4.2 is an important update to the Bluetooth Core Specification delivering exciting new features and benefits for Bluetooth Smart. This will create significant advantages for developers and manufacturers, while providing a better user experience for their customers. Bluetooth 4.2 makes Bluetooth Smart even smarter, faster and the ideal wireless technology for the Internet of Things (IoT).[76]

Resumidamente as diferenças de aplicação entre as versões são destacadas a seguir:

- Bluetooth BR/EDR (2.0/2.1): Estabelece uma distância relativamente curta, conexão sem fio contínua, o que o torna ideal para os casos de uso, tais como streaming de áudio.
- Bluetooth LE (4.0): Rajadas de conexão de rádio de longo alcance, tornando-o ideal para a Internet das Coisas (IoT), aplicações que não necessitam de conexão contínua, mas dependem de longa duração da bateria.

### Z-WAVE

Z-Wave é uma tecnologia desenvolvida pela Zensys e padronizado pela Z-Wave Alliance, para automação em ambientes residenciais e comerciais. Ela usa um rádio RF de baixa potência para aplicações de controle remoto. O principal objetivo do Z-Wave é permitir transmissão de mensagens curtas com consistência a partir de uma unidade de controle a um ou mais nós na rede[77]. Topologias de malha podem ser formadas, no entanto, o esquema de endereçamento utilizado permite um máximo de 232 nós na rede.

O rádio Z-Wave atua principalmente em 900 MHz (868 MHz na Europa e 908 MHz nos Estados Unidos) e 2,4 GHz, com taxas de dados entre 9,6 kbps e 40 kbps, e o alcance do sinal efetivo é de 30 metros em ambientes fechados e é capaz de exceder a 100



metros ao ar livre, adequado para aplicações com baixa taxa de transmissão de dados. A medida que a distância da comunicação aumenta, o mesmo ocorre com a complexidade do dispositivo, o consumo de energia e os custos do sistema. Uma característica do chip de comunicação Z-Wave, é que ele pode ser colocado no estado de dormência num longo período de tempo, de modo que o consumo de energia é muito baixo, fornecendo maior duração da bateria para os dispositivos.

Embora atualmente o Z-Wave seja mais popular do que ZigBee para aplicações de automação residencial, muitos especialistas do setor advertem que Z-Wave sofre de algumas limitações fundamentais quando comparado com ZigBee, já que Zigbee tem latência mais baixa (10 ms) e maior taxa de transferência do que Z-Wave (latência de 100 ms). Embora o Z-Wave tenha capacidade de redes mesh, este mecanismo não é tão robusto quanto ZigBee.

O Z-Wave define dois tipos de dispositivos: controladores e escravos. Controladores fazem requisições ou enviam comandos para os escravos, que respondem aos controladores ou executam os comandos recebidos.

### 2.6.2 Tecnologias IP

#### Wi-Fi

O objetivo do padrão IEEE 802.11[78] é fornecer conectividade sem fio para dispositivos que requerem uma instalação rápida, como computadores portáteis, PDAs ou dispositivos geralmente móveis dentro de uma WLAN (Wireless Local Area Rede).

A rede IEEE 802.11 é uma especificação de rede local sem fio (WLAN). No seu modo de banda baixa, IEEE 802.11 (b, g, n), pode transmitir dados de 11 Mbps até 54Mbps e vai até 32 metros em ambientes fechados e 95 metros ao ar livre[79]. O padrão IEEE 802.11n utiliza o dobro do espectro de frequência em comparação com 802.11a ou 802.11g. No entanto, IEEE 802.11a, pode operar com uma taxa de transmissão de até Gbps e pode exceder a faixa por mais de duas vezes do que os padrões 'b' e 'g'. No modo de banda baixa, o Wi-Fi transmite na faixa não licenciada (ISM) de 2,4 GHz, enquanto a banda alta transmitir na faixa de 5 GHz.

Um novo padrão Wi-Fi, 802.11ah, na banda não licenciada de 900 MHz, para aplicações de automação residencial e predial é esperado chegar ao mercado ainda este

ano[80]. Ele estará competindo com outros protocolos já estabelecidos nesta banda, como o ZigBee. WiFi AH visa apoiar uma gama de opções de taxa de transferência de 150Kbits com uma banda de 1MHz a até 40Mbits sobre uma banda de 8MHz. Espera-se também cobrir distâncias de 50% a mais do que outros produtos 802.11n.

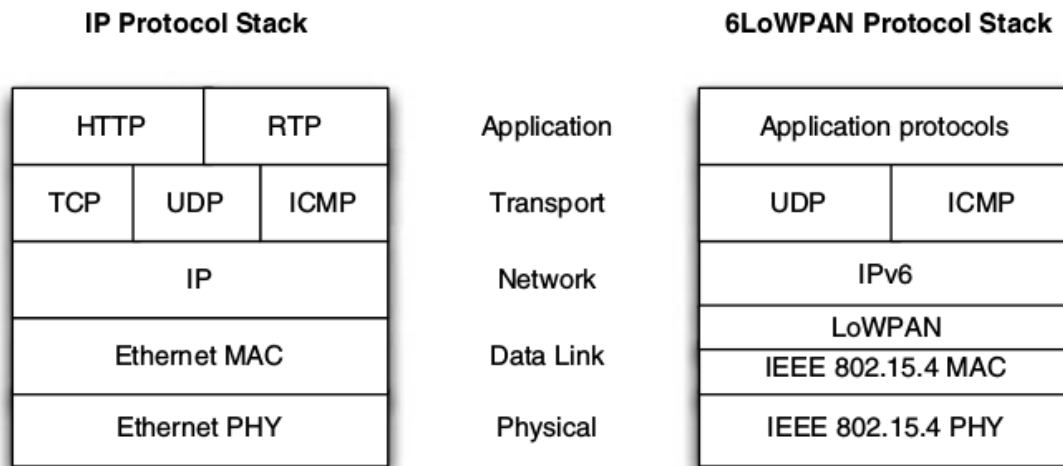
O padrão 802.11af[81], também chamado de Super Wi-Fi ou White-Fi, emprega o espectro de frequências de TV não utilizadas, entre 54 MHz e 790MHz, em intervalos muito longos (possivelmente vários quilômetros). Pode oferecer rendimento razoável, talvez 24MB/s. Tem aplicações semelhantes ao 802.11ah, também conhecido como Low Power Wi-Fi, que irá fornecer largura de banda para sensores e monitores em gadgets e aparelhos que irão juntar-se para criar a Internet das Coisas.

### **6LoWPAN**

6LoWPAN é uma definição de protocolo que descreve como utilizar IPv6 em cima de uma rede de baixo consumo de energia, baixa taxa de dados, redes sem fio de área pessoal (WAN) e de baixo custo [82]. Os nós no 6LoWPAN são ligados em uma topologia de estrela ou de malha e com suporte a taxas de transmissão de dados de 20 a 250kbps a uma distância de cerca de dez metros. Projetado para enviar pacotes IPv6 sobre redes baseadas em IEEE 802.15.4 e implementar padrões IP abertos, incluindo TCP, UDP, HTTP, COAP, MQTT e websockets.

Esta norma é desenvolvida para que os dispositivos de sensores sem fio possam se conectar a redes IP existentes, como redes IPv4, sem a necessidade de gateways de tradução ou proxy[82]. A camada física padrão 6LoWPAN é baseado em IEEE 802.15.4 (PHY) com 868/914 MHz ou 2,4 GHz rádio. A sub-camada MAC 6LoWPAN é totalmente compatível com IEEE 802.15.4 MAC[83]. A estrutura de pilha 6LoWPAN está ilustrada na figura 2.12. Na pilha de protocolos, a camada de ligação está dividida em sub-camada IEEE 802.15.4 MAC e da camada de adaptação 6LoWPAN[82].

Em termos de roteamento da camada IP, 6LoWPAN suporta protocolos tais como protocolos de roteamento de baixa potência e redes com perdas (RPL)[84], que atenua problemas, tais como estatísticas de link não determinísticos e falta de visibilidade sobre topologia física. 6LoWPAN suporta segurança apenas da camada de enlace através de criptografia de 128 bits AES (Advanced Encryption Scheme). A coexistência com outros dispositivos, tais como Wi-Fi, não é eficiente, por causa da utilização de mesmo canal por todos os dispositivos. Alguns dispositivos podem tirar vantagem ao usar o rádio de



**Figura 2.12** Pilhas do protocolo IP e 6LoWPAN [82]

2,4 GHz, mas, mesmo assim, apenas três (15, 20 e 25) dos dezesseis canais vão evitar interferências[85].

## 2.7 Protocolos

### 2.7.1 REST

O REST - *Representational State Transfer*, ou, em tradução livre, Transferência de Estado Representativo, é uma técnica de engenharia de software criado pelo Dr. Roy Fielding[86], um dos autores da especificação do HTTP. Esta técnica foi criada para trabalhar em sistemas distribuídos como o próprio WWW (World Wide Web). REST define como o design da aplicação se comportará: uma rede de websites (um estado virtual), onde o usuário progride com uma aplicação selecionando as ligações (transições do estado), tendo como resultado a página seguinte (que representa o estado seguinte da aplicação) que está sendo transferida ao usuário e apresentada para seu uso[86]. Cada recurso possui um identificador único, chamado URI (Universal Resource Indicators), que permite o acesso a tais recursos através de uma URL.

Um recurso é um mapeamento conceitual para um conjunto de entidades, que segundo [87] “os clientes não acessam os recursos diretamente, mas, em vez disso, uma representação do recurso através de uma interface uniforme”. Tais recursos são apresentados, geralmente, em XML ou JSON. A abstração chave da informação em REST é um recurso.

Qualquer informação que pode ser chamada pode ser um recurso: um documento ou uma imagem, um serviço temporal (por exemplo, "o tempo de hoje em Los Angeles"), uma coleção de outros recursos, um objeto não-virtual (por exemplo, uma pessoa), e assim por diante. Em outras palavras, qualquer conceito que pode ser o alvo de referência de hipertexto de um autor deve caber dentro da definição de um recurso. Um recurso é um mapeamento conceptual para um conjunto de entidades [86].

O sucesso desta técnica de engenharia de software, aplicado na arquitetura cliente-servidor, é devido à possibilidade de separar do servidor, a responsabilidade de montar a interface de apresentação de dados aos clientes. Dessa forma as aplicações podem migrar para uma série de plataformas, independente dos servidores. A separação de interesses é o princípio por trás das restrições de cliente-servidor. Ao separar as preocupações da interface de usuário das preocupações de armazenamento de dados, podemos melhorar a portabilidade da interface do usuário através de múltiplas plataformas e melhorar a escalabilidade, simplificando os componentes do servidor. Talvez o mais importante para a Web, no entanto, é que a separação permite que os componentes evoluam de forma independente, suportando, assim, a exigência da Internet escalar de vários domínios [86].

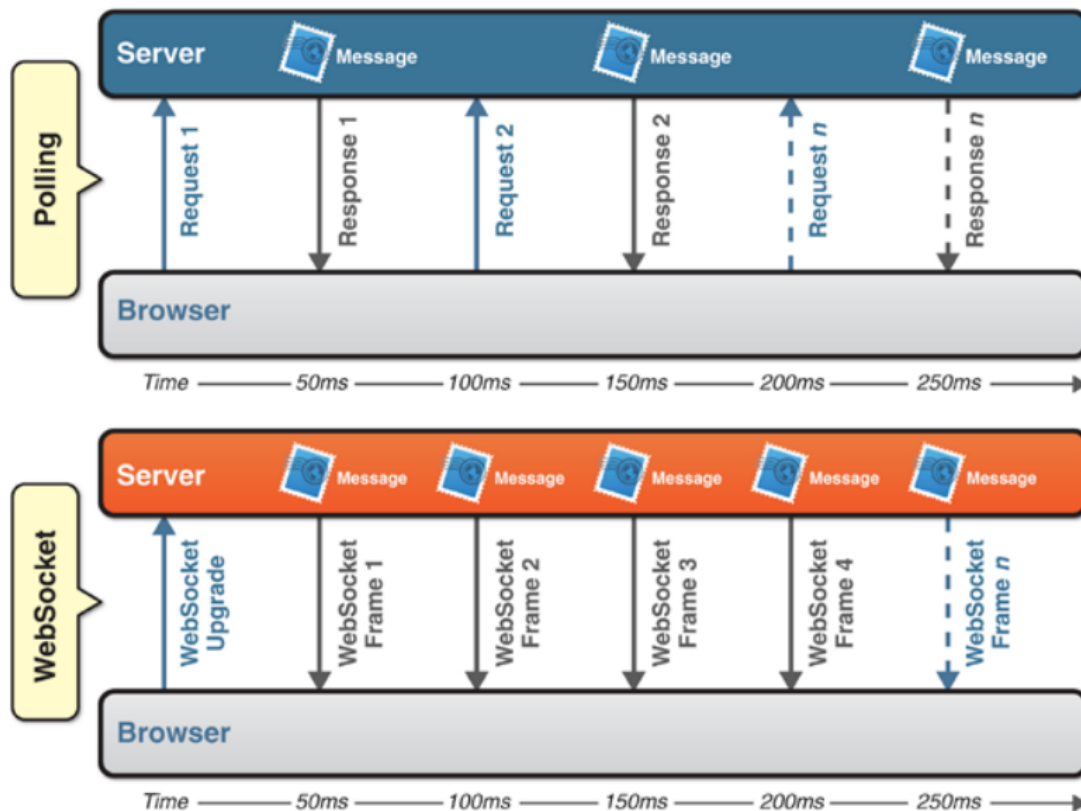
Como já citado, os recursos acessados por uma aplicação REST são apresentados em representações de dados, geralmente, identificado por um par, nome e valor. A representação consiste em metadados que descrevem os dados e, em certas ocasiões, metadados para descrever metadados (geralmente com a finalidade de verificar a integridade da mensagem). Metadados são na forma de pares nome-valor, onde o nome corresponde a um padrão que define a estrutura e semântica do valor. As mensagens de resposta podem incluir tanto metadados representativos quanto metadados de recursos: informações sobre o recurso que não é específico para a representação fornecida [86].

### 2.7.2 WebSocket

O WebSocket é uma tecnologia que permite a comunicação entre cliente e servidor de forma bidirecional (full-duplex), sobre um único soquete TCP. Foi desenvolvido para clientes HTTP com suporte a HTML5, entretanto, seu uso pode se estender a qualquer aplicação cliente-servidor[88, 89].

Devido ao fato de realizar um único pedido de conexão, e esta conexão ser full-duplex, o servidor não precisa esperar uma requisição do cliente para o envio de dados. Da mesma

forma, o cliente pode enviar informações a qualquer momento para o servidor. Isto causa uma redução significativa da latência, comparando a um *Polling* HTTP (requisições de tempos em tempos). A comparação entre os mecanismo tradicional usando *Polling* e usando WebSocket, na figura 2.13.



**Figura 2.13** Comparação de comunicação entre Pulling e WebSocket [88]

O protocolo WebSocket é executado em duas etapas. A primeira é uma mensagem de handshake (aperto de mão), onde tanto o cliente quanto o servidor enviam suas respectivas informações. Após um handshake bem sucedido, se inicia a transferência de dados.

Segundo [89], os dados são transferidos em unidades conceituais denominadas mensagens, onde estas não necessariamente representam *frames* da camada de rede. Neste caso um *frame* possui um tipo associado, e cada *frame* pertence à mesma mensagem, contendo o mesmo tipo de dados. Existem, de forma geral, três tipos de dados específicos. São eles (1) os dados textuais, interpretados em UTF-8; (2) dados binários, interpretados pela aplicação, e (3) *frames* de controle, responsáveis pelas sinalizações em nível de protocolo, como informar que a conexão deve ser fechada.

### 2.7.3 CoAP

O CoAP, acrônimo de Constrained Application Protocol, é um protocolo da camada de aplicação leve e facilmente mapeável que tem o como finalidade, projetar um protocolo web genérico para necessidades específicas de ambientes com restrições de recursos, tais como, memória, energia ou processamento. Sua tecnologia objetiva reduzir, ao máximo possível, o tamanho das mensagens utilizadas em sua comunicação[90].

O CoAP foi criado em 2010 por um grupo de trabalho do IETF (Internet Engineering Task Force) chamado CoRE (Constrained RESTful Environments)<sup>9</sup>, com objetivo de prover um framework para aplicações que manipulam recursos simples localizados em dispositivos interligados em redes limitadas, incluindo desde aplicações que monitoram sensores de temperatura e medidores de energia, até controle de atuadores como interruptores ou trancas eletrônicas, e também aplicações que gerenciam os dispositivos que compõem a rede[91].

O CoAP baseia-se na abordagem de arquitetura REST, projetado para o mapeamento fácil e sem estado (stateless) com o HTTP, e para proporcionar interação M2M. A compatibilidade com HTTP é obtida através da manutenção do mesmo modelo de interação, mas utilizando um subconjunto dos métodos HTTP[90].

Principais características definidas pela especificação:

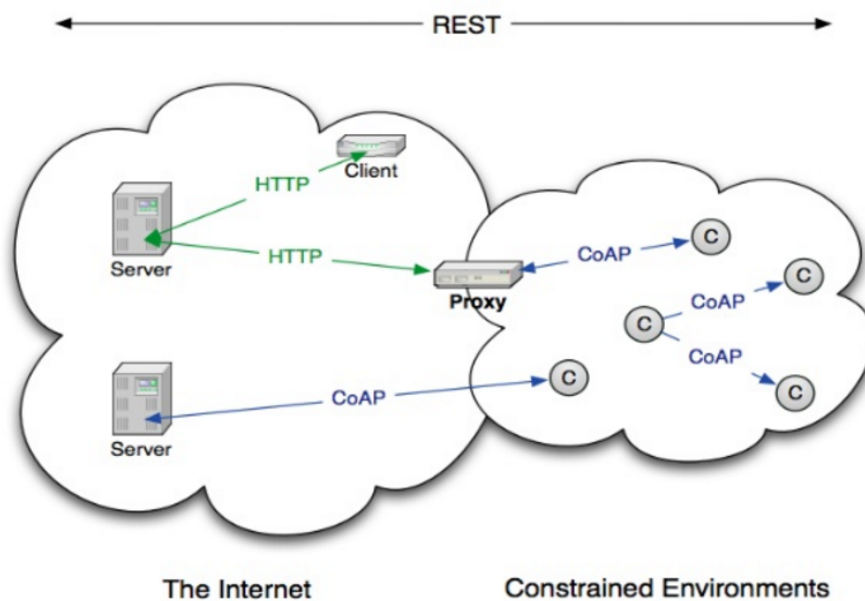
- Protocolo Web que cumpre com os requerimentos M2M em ambientes restritos;
- Troca de mensagens assíncrona;
- Suporte à URI e Content-Type;
- Capacidades simples de proxy e caching;
- Mapeamento HTTP que permite que proxies possam prover acesso aos recursos do CoAP via HTTP de maneira uniforme;
- Interligação segura usando Datagram Transport Layer Security (DTLS);
- Ligação em UDP com confiabilidade opcional suportando requisições tanto unicast quanto multicast;

---

<sup>9</sup><https://datatracker.ietf.org/wg/core/charter/>

- Suporte aos métodos GET, POST, PUT, DELETE.

A figura 2.14 ilustra a arquitetura CoAP em uma perspectiva de alto nível. Um dos objetivos do CoRE também consiste em adequar a arquitetura REST, para ambientes restritos, composto por nós (ex.: microcontroladores 8-bits com memória limitada) e redes (ex.: 6LoWPAN e RFC4944<sup>10</sup>). O CoAP foi desenvolvido de acordo com esta arquitetura, logo pode ser considerado como um protocolo RESTful[90].



**Figura 2.14** Visão geral da arquitetura CoAP [92]

## 2.7.4 MQTT

O protocolo MQTT (MQ Telemetry Transport)[93], é um protocolo leve, baseado em mensagens seguindo o padrão *publish/subscribe*, executado sobre TCP/IP, usado para sensores remotos e controle de dispositivos em ambientes com restrições como redes de baixa largura de banda, pouco confiáveis ou comunicações intermitentes, principalmente encontrados em contextos Machine to Machine (M2M) e Internet das Coisas (IoT). O protocolo foi projetado para ser aberto, simples, leve e fácil de implementar. Estas características o fazem ideal para ser utilizado em ambientes e dispositivos com restrições de memória e largura de banda, mas não limitados a estes.

<sup>10</sup><https://tools.ietf.org/html/rfc4944>

O MQTT foi criado em meados de 1999 por Andy Stanford-Clark (IBM) e Arlen Nipper (Eurotech). Atualmente, na versão 3.1.1, a especificação do MQTT faz parte dos padrões OASIS[94]. O MQTT, na sua essência, compartilha algumas características com o CoAP:

- São padrões abertos;
- São mais adequadas para ambientes com restrições;
- Fornecem mecanismos para comunicação assíncrona;
- Executam sobre a pilha IP;
- Têm uma série de implementações.

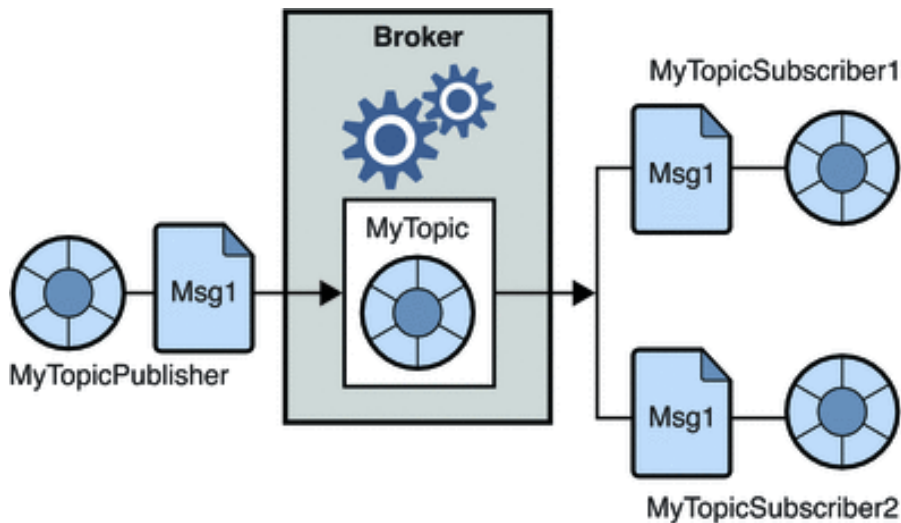
### Arquitetura

O protocolo segue o padrão publish/subscribe (pub/sub), que é uma alternativa para o modelo cliente-servidor tradicional, onde um cliente se comunica diretamente com um ponto final. No entanto, o padrão publish/subscribe desacopla um cliente, que está enviando uma mensagem particular (chamado nesse caso de *publisher*) de outro cliente (ou mais), que está recebendo a mensagem (chamado *subscriber*). Isto significa que o *publisher* e *subscriber*, não sabem da existência do outro. Há um terceiro componente, chamado de *broker*, que é conhecido tanto pelo *publisher* quanto pelo *subscriber*, que filtra todas as mensagens recebidas e distribui de forma adequada.

As mensagens a serem transmitidas são publicadas para um endereço (chamado de tópico), que assemelha-se a um sistema de arquivos, por exemplo, *casa/sala/temperatura*. Clientes por sua vez podem se inscrever para vários tópicos, tornando-se assim capazes de receber as mensagens que outros clientes publicam neste tópico. A figura 2.15 mostra uma rede de três clientes conectados com um broker central. Quando o cliente “*MyTopicPublish*”, envia uma mensagem para o tópico “*MyTopic*”, todos os interessados (*subscribers*) recebem esta mensagem.

O MQTT não define o tipo dos dados contidos na mensagem (payload), o *publisher* pode enviar dados binários, dados textuais ou dados estruturados como XML e JSON. Uma mensagem MQTT também tem mais alguns atributos, que nós vamos discutir em detalhes a seguir.

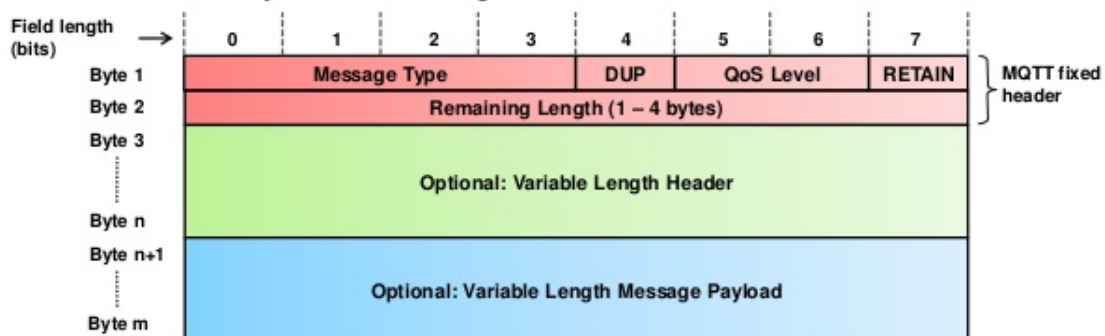




**Figura 2.15** Padrão MQTT - Publish/Subscribe [95]

### Formato da Mensagem

As mensagens MQTT possuem um cabeçalho fixo composto de dois bytes, campos opcionais de cabeçalhos variáveis e conteúdo da mensagem (payload). Os cabeçalhos opcionais e payload dependem do tipo da mensagem transmitida. A figura 2.16 mostra o formato das mensagens MQTT.



**Figura 2.16** Formato da mensagem MQTT [96]

No primeiro byte do cabeçalho fixo, os quatro primeiros bits representam o tipo de mensagem, conforme a tabela 2.1, e os quatro bits restantes são descritos a seguir:

- **Duplicate delivery (DUP):** acrônimo relativo à entrega duplicada, este marcador ocupa o bit 4 e é ativado quando o cliente ou o servidor tentam reenviar mensagens do tipo *PUBLISH*, *PUBREL*, *SUBSCRIBE* ou *UNSUBSCRIBE*, que tenham QoS >

0.

- **Quality of Service (QoS):** este marcador ocupa os bits 5 e 6, e indica o nível de garantia da entrega de uma mensagem *PUBLISH*. Os níveis de QoS são mostrados na tabela 2.2.
- **RETAIN:** quando um cliente envia uma mensagem *PUBLISH* ao servidor com este marcador ativado, ela deve ser retida no servidor mesmo depois de ser entregue aos assinantes. No ocasião de uma nova subscrição a um tópico, a última mensagem retida para este tópico deve ser enviada para o novo assinante.

A largura restante do cabeçalho fixo (byte 2) é usada para representar a quantidade de bytes remanescentes na mensagem. Incluindo dados do cabeçalho variável e do payload.

O cabeçalho variável é um componente presente em alguns tipos de mensagem MQTT e está localizado entre o cabeçalho fixo e o payload.

O payload pode armazenar diferentes tipos de informações, tudo vai depender do tipo da mensagem transmitida: *CONNECT* (irá conter ID do cliente), *SUBSCRIBE* (contém tópicos que o cliente deseja inscrever) ou *SUBACK* (lista de níveis de QoS garantidos pelo servidor).

| Mnemônico   | Código | Descrição   |
|-------------|--------|---|
| Reservado   | 0      | Reservado   |
| CONNECT     | 1      | Requisição de conexão do cliente ao servidor        |
| CONNACK     | 2      | ACK de conexão                                      |
| PUBLISH     | 3      | Publicação de mensagem                              |
| PUBACK      | 4      | ACK de publicação                                   |
| PUBREC      | 5      | Publicação recebida (garantia de entrega parte I)   |
| PUBREL      | 6      | Publicação liberada (garantia de entrega parte II)  |
| PUBCOMP     | 7      | Publicação completa (garantia de entrega parte III) |
| SUBSCRIBE   | 8      | Requisição de subscrição do cliente                 |
| SUBACK      | 9      | ACK de subscrição                                   |
| UNSUBSCRIBE | 10     | Requisição de cancelamento de subscrição do cliente |
| UNSUBACK    | 11     | ACK de cancelamento de subscrição                   |
| PINGREQ     | 12     | Requisição PING                                     |
| PINGRESP    | 13     | Resposta PING                                       |
| DISCONNECT  | 14     | Cliente desconectando                               |
| Reservado   | 15     | Reservado   |

**Tabela 2.1** MQTT - Tipos de mensagem [93]

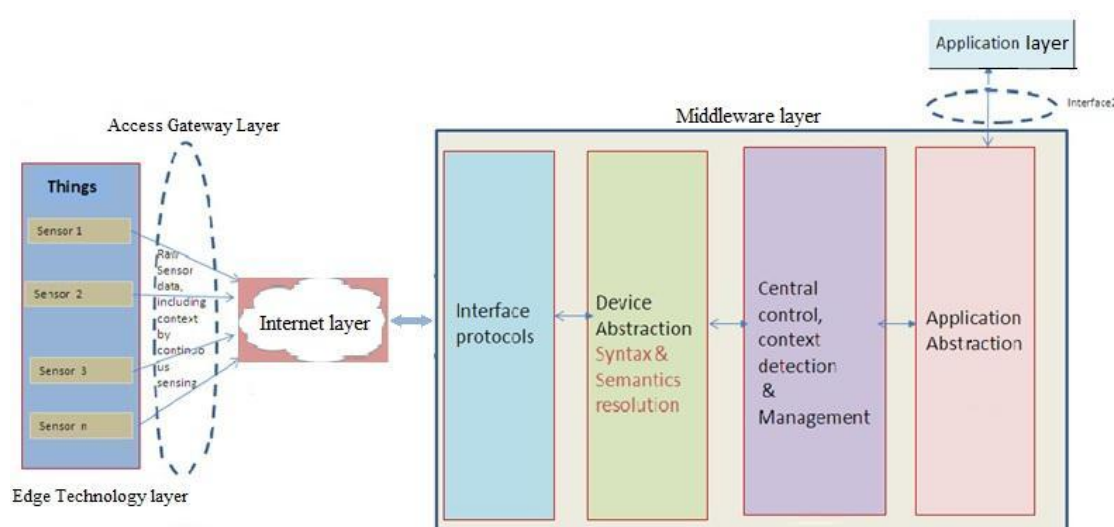
| Valor QoS | Bit 2 | Bit 1 | Descrição                          |
|-----------|-------|-------|------------------------------------|
| 0         | 0     | 0     | Até uma vez (Disparar e esquecer)  |
| 1         | 0     | 1     | Ao menos uma vez (Entrega com ACK) |
| 2         | 1     | 0     | Entrega garantida                  |
| 3         | 1     | 1     | Reservado                          |

**Tabela 2.2** MQTT - Níveis de QoS [93]

## 2.8 Middleware

É uma camada de software que lida com a execução e desenvolvimento de aplicações distribuídas. Localiza-se entre o Sistema Operacional (SO) e a aplicação abstraindo a complexidade e a heterogeneidade dos elementos do sistema, além de coordenar como eles interagem entre si[97]. Basicamente, utiliza mecanismos de comunicação de baixo nível com a infraestrutura, para assim fornecer uma comunicação de alto nível para as aplicações. Os middlewares podem ser classificados em diversas categorias, e essas categorias estão baseadas, por exemplo, na abstração fornecida para a programação da comunicação (tuplas distribuídas, procedimentos, mensagens e objetos distribuídos), em como as entidades se comunicam (cliente/servidor, ponto-a-ponto e publish/subscribe), e no tipo de comunicação (síncrona, assíncrona).

Bandyopadhyay, S. et. al. realizou estudos sobre sistemas de middleware que foram aplicados em sistemas baseados em IoT[7]. Eles classificam a funcionalidade necessária do middleware para gerenciar interações com uma variedade de dispositivos em quatro componentes funcionais, a saber: (1) protocolos de interface, (2) abstração de dispositivos, (3) de controle central, detecção e gerenciamento de contexto, e (4) abstração da aplicação (Figura 2.17). A seguir, vamos explicar estes componentes em detalhes.



**Figura 2.17** Componente do Middleware de IoT [7]

## Protocolos de Interface

Este componente é responsável pelo fornecimento da *interoperabilidade técnica*. Interoperabilidade no contexto de protocolos de interface significa: *a capacidade de dois sistemas interagirem utilizando os mesmos protocolos de comunicação*. Conforme ETSI (European Telecommunications Standards Institute)[98], *interoperabilidade técnica é definida como a associação de componentes hardware ou software, sistemas e plataformas que permitem comunicação máquina-a-máquina. Este tipo de interoperabilidade é muitas vezes centrado em protocolos (comunicação) e infraestrutura necessária para esses protocolos operarem*.

O componente de protocolo de interface define protocolos para a troca de informações entre as diferentes redes que podem funcionar com base em diferentes protocolos de comunicação, a fim de permitir a interoperabilidade técnica. Este componente é responsável pelo tratamento de conectividade básica na ligação física e de dados, rede, transporte, e às vezes na camada de aplicação da pilha TCP / IP.

Para lidar com a heterogeneidade de dispositivos, podemos usar uma camada de abstração (wrapper) para cada dispositivo, para traduzir o protocolo suportado pelo dispositivo para um protocolo comum. Esta abstração pode ser colocada no lado do dispositivo ou do lado de middleware. Se quisermos ter uma interação direta com dispositivos,

devemos colocar o a abstração no lado do middleware. Dispositivos normalmente têm capacidade limitada de processamento computacional, pelo que esta seria uma razão para implementar a abstração no lado do middleware.

### **Abstração de dispositivos (Device Abstraction)**

Este componente é responsável pelo fornecimento de um formato abstrato para facilitar a interação dos componentes de aplicação com os dispositivos. Esta abstração fornece interoperabilidade sintáctica e semântica, que são definidos pelo ETSI[98], como segue:

- *Interoperabilidade sintática* está associada com formatos de dados. as mensagens transferido por protocolos de comunicação deve ter uma sintaxe bem definida e formato de codificação, o qual pode ser representado utilizando sintaxes de transferência de alto nível tais como, JSON e XML.
- A *interoperabilidade semântica* é geralmente associada com o significado do conteúdo da mensagem que é compreensível para todos envolvidos na comunicação. Assim, a interoperabilidade a este nível, significa que há um entendimento comum entre os componentes sobre o significado do conteúdo (informação) que estão sendo trocadas entre eles. Interoperabilidade semântica se baseia em modelos semânticos que tende a ser de domínio específico. Por exemplo, uma forma de oferecer interoperabilidade semântica em middlewares orientadas a serviços (SOA)[99] é usando *Devices Profile for Web Services* (DPWS)[100]. Neste contexto, cada tipo de dispositivo refere-se a um tipo de serviço diferenciado.

### **Controle Central, Detecção de Contexto e Gerenciamento**

Contexto caracteriza a situação de uma entidade, que pode ser um lugar, uma pessoa ou um objeto que é relevante para o usuário, aplicações e suas interações [7]. Este componente é responsável por suportar a computação baseada em contexto (context-aware)[101], que é um modelo computacional que levam em conta o contexto das entidades que interagem com o sistema. Um middleware para sistemas baseados em Internet das Coisas deve estar ciente de contexto para trabalhar em ambientes inteligentes[7]. Ambientes inteligentes referem-se a um mundo físico que é ricamente e invisivelmente entrelaçada com sensores, atuadores, monitores e elementos computacionais, encaixado perfeitamente nos objetos

do cotidiano de nossas vidas, e conectado através de uma rede contínua. A consciência do contexto inclui duas funcionalidades:

- *A detecção de contexto*, que consiste em recolher os dados dos recursos, e selecionar a informação que pode ter um impacto sobre o cálculo.
- *Processamento de contexto*, para usar as informações coletadas para realizar uma tarefa ou tomar uma decisão.

## **Abstração da Aplicação**

Este componente fornece uma interface de alto nível para aplicações e os utilizadores finais, para interação com os dispositivos. Por exemplo, esta interface pode ser uma interface REST ou pode ser implementada com alguma linguagem baseado na consulta.

### **2.8.1 Padronização**

Um único padrão para um middleware genérico de IoT, provavelmente não vai existir, devido ao grande número e diferentes tipos de aplicações e domínios envolvidos. No entanto, existem consideráveis esforços para proporcionar um solução de middleware padronizado, específico para um determinado domínio. Por exemplo, a visão proposta em [6] direciona-se no sentido de um middleware padronizado para o domínio de aplicações de web semântica, enquanto que a solução fornecida em [102], tem como proposta oferecer uma abstração para uma plataforma única para ambientes de redes de sensores. Para ambientes inteligentes com uma infraestrutura fixa, como escritórios inteligentes, a solução fornecida em [103] pode perfeitamente se adequar às exigências requeridas para o middleware neste contexto. Assim, é previsível que as plataformas de middleware para IoT terão mais do que um padrão para permitir aplicações em diferentes domínios.

O conjunto de padrões estabelecidos para o desenvolvimento de plataformas de middleware que venham atender os requisitos de todos os domínios de aplicações, podem formar uma plataforma de normalização para pesquisas e para indústria. Isto irá permitir a seleção do padrão desejado que se encaixa em uma determinada aplicação, dentro de um domínio específico.

## **2.9 Considerações Finais**

Este capítulo apresentou um resumo dos conceitos, que fundamentam o desenvolvimento de middleware e firmware, bem como os protocolos envolvidos na construção de projetos de IoT.

# 3

## Trabalhos Relacionados

### 3.1 OpenIoT

O OpenIoT é um projeto co-financiado pelo FP7 (European Union's Research and Innovation), para permitir "criar aplicações da Internet das Coisas em grande escala de acordo com um modelo de entrega de *cloud computing*"[104] O objetivo principal é desenvolver uma infraestrutura de middleware para implementar e integrar soluções da Internet das Coisas em um paradigma "Sensing as a Service".

O projeto foca na convergência entre IoT e computação em nuvem, visando assim fornecer uma “nuvem de coisas” (cloud of things, em Inglês). Ele é apresentado como uma extensão para implementações serviços e recursos computacionais remotos, onde ele irá fornecer acesso a recursos e capacidades dos dispositivos gerenciados pela sua plataforma. OpenIoT abrange diversas áreas, a fim de constituir uma solução mais completa:

- Middleware - para conexão de sensores e redes de sensores com a plataforma (sensores ou fluxos de dados, a partir de dispositivos físicos ou algoritmos de processamento apresentado como dispositivos virtuais);
- Integração de Sensores - representado como sensores virtuais, utilizando estruturas de middleware para redes de RFID / sensores sem fio (RSSF) e Internet das coisas, fornecendo funcionalidades de linha de base para o registro e de pesquisa, integração de sensores com o mínimo esforço;
- Ontologias, modelos semânticos e anotações - para representar informações sobre



objetos;

- Computação em Nuvem, para fornecer disponibilidade com segurança e privacidade;
- Configuração flexível e implementação de algoritmos para a coleta e filtragem de fluxos de informação;
- Ferramentas visuais para gerenciar sensores e seus dados, para a composição de serviços e para a visualização de dados com esforço mínimo de programação.

A arquitetura da OpenIoT (Figura 3.1) é composta por três planos lógicos distintos: (1) Utilitário/Aplicação; (2) Plano Virtualizado; e (3) Plano Físico. Tais planos, por sua vez, são compostos por sete módulos principais, apresentados a seguir.

#### **Plano Utilitário / Aplicação**

- O componente *Request Definition*, permite especificação, em tempo de execução, de solicitações de serviços para a plataforma OpenIoT, fornecendo uma interface Web 2.0. Compreende um conjunto de serviços para a especificar e formular tais pedidos, ao mesmo tempo, submetê-los ao agendador (*Scheduler*) global.
- O componente *Request Presentation*, seleciona mashups a partir de uma biblioteca apropriada, a fim de facilitar a apresentação de um serviço em uma interface Web 2.0. Para visualizar estes serviços, ele se comunica diretamente com o Service Delivery & Utility Manager, de modo a recuperar os dados relevantes.
- A componente de configuração e monitoramento (*Configuration and Monitoring*), permite o gerenciamento e configuração de funcionalidades sobre os sensores e os serviços que são implantados dentro da plataforma OpenIoT. Além disso, permite ao usuário monitorar o estado dos diferentes módulos implementados.

#### **Plano Virtualizado**

- O agendador (*Scheduler*) processa todas as solicitações de serviços a partir da definição da solicitação (*Request Definition*) e garante o seu acesso adequado aos recursos (por exemplo, fluxos de dados) de que necessitam.

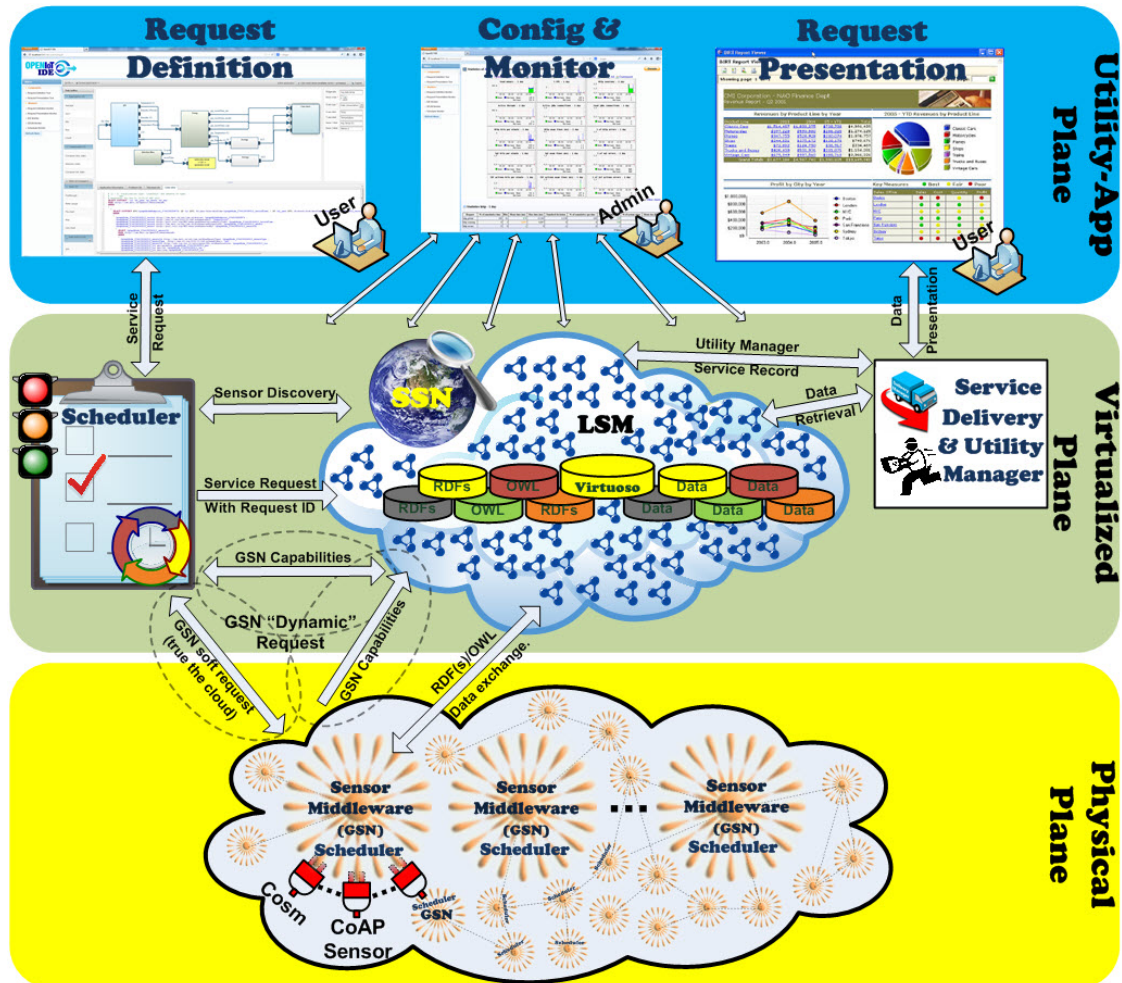


Figura 3.1 Architettura OpenIoT [82]

- A Nuvem de armazenamento de dados (LSM-Light), permite o armazenamento de fluxos de dados provenientes do sensor, agindo assim como um banco de dados em nuvem. O serviço armazena os metadados necessários para o funcionamento da plataforma OpenIoT (dados funcionais). A implementação do protótipo da plataforma OpenIoT usa o LSM Middleware, que foi re-projetado com funcionalidades de dados push-pull e interfaces para permitir streaming de processamento baseado em nuvem.
- O serviço de entrega e gerenciador de utilitários (Service Delivery & Utility Manager), executa um duplo papel. Por um lado, ele combina os fluxos de dados como indicado pelos fluxos de trabalho (workflows) dentro do sistema OpenIoT a fim de entregar o serviço solicitado (com a ajuda da consulta SPARQL fornecido pelo Scheduler), quer para a solicitação de apresentação ou um aplicativo externo. Por outro lado, esse componente atua como um mecanismo de medição de utilização dos serviços, o que mantém o controle das métricas cada serviço individualmente.

### **Plano Físico**

- O Sensor-Middleware (Extended Global Sensor Network, X-GSN), recolhe, filtra, combina, e semanticamente anota fluxos de dados a partir de sensores virtuais ou dispositivos físicos. Ele atua como um hub entre a plataforma OpenIoT e o mundo físico. O Sensor-Middleware é implantado com base em uma ou mais instâncias distribuídos (nós), que podem pertencer a diferentes entidades administrativas. A implementação do protótipo da plataforma OpenIoT usa o sensor-middleware GSN que foi ampliado e chamado X-GSN.

## **3.2 Eclipse IoT**

Eclipse IoT é um ecossistema de empresas e indivíduos que trabalham em conjunto para estabelecer uma Internet das Coisas com base em tecnologias abertas[105]. O projeto fornece blocos de construção que se apoiam em cima de padrões e protocolos abertos e fornecem serviços e estruturas adicionais para gerenciamento de dispositivos, comunicação e soluções verticais.

O primeiro projeto Eclipse IoT começou em novembro de 2012, hoje é composto por

subprojetos, focados no desenvolvimento de aplicações para Internet das coisas e M2M. Em seguida é apresentado os principais projetos mantidos de grupo.

### 3.2.1 Padrões e Protocolos

- **Paho:** prevê a implementação de clientes para o protocolo de mensagens MQTT. O Paho, inclui clientes para Java, C, C++, Python, JavaScript e outras implementações da da norma MQTT;
- **Mosquitto:** implementação do servidor de MQTT;
- **Californium:** é uma implementação Java do CoAP (Constrained Application Protocol);
- **OM2M:** é uma implementação do padrão OneM2M[106] (anteriormente chamado de padrão ETSI M2M). OM2M é um conjunto de serviços Java e OSGi que implementam o padrão OneM2M;
- **Wakaama:** é uma implementação do protocolo OMA Lightweight M2M, para o dispositivos e gerenciamento de serviços. Wakaama é escrito em C e projetado para ser portátil para sistemas compatíveis com POSIX.

### 3.2.2 Frameworks e Serviços

- **Kura:** é um conjunto de serviços Java e OSGi que implementam os serviços comuns necessários para um gateway de Internet das Coisas, tais como: (1) conexão de I/O com portas seriais, USB, Bluetooth, GPS, (2) serviços de dados, (3) gerenciamento remoto, etc.
- **Eclipse SCADA:** é um conjunto de serviços Java e OSGi para a criação de sistemas de controle industrial que monitoram e controlam processos industriais, como o chão de fábrica ou fazendas solares.
- **Eclipse SmartHome:** é um conjunto de serviços para integração de domótica em Java e OSGi. Este projeto fornece um ponto de acesso uniforme para os diversos dispositivos e protocolos de automação residencial diferentes.

- **Ponte:** é um broker projetado para fazer a ponte entre protocolos diferentes da Internet das Coisas (como MQTT e CoAP) e fornecer uma API REST para esses padrões.
- **Concierge:** é uma implementação do padrão OSGi, voltado para pequenos dispositivos da Internet das Coisas.
- **Krikkit:** é um projeto para definir regras para as mensagens que passam através de um dispositivo de borda (edge device).
- **Mihini:** é um framework baseado em Lua para a criação de aplicativos para gateways IoT e M2M.

O Eclipse IoT é um projeto que vêm ganhando tração e incorporando novos projetos[107]. Hoje conta com cerca de 110 colaboradores e é apoiados por empresas como IBM, Eurotech, 2lemetry, Cisco, e outras.

### 3.3 BUTLER

BUTLER, acrônimo de uBiquitous, secUre inTernet-of-things with Location and contExt-awareness, é um desenvolvido no âmbito do FP7, lançado oficialmente em 2014, com o propósito de possibilitar o "desenvolvimento de aplicações seguras e inteligentes de assistência pessoal graças a um sistema pervasivo ciente de contexto e localização"[108]. BUTLER se concentra em:

- Melhorar / criar tecnologias para implementar uma Internet das Coisas que seja segura (ligações seguras do físico para as camadas de aplicação), pervasiva (aplicações abrangem diferentes cenários) e dependente do contexto (ajusta às necessidades do usuário).
- Integração / desenvolvimento de uma arquitetura em rede de dispositivos inteligentes, onde os dispositivos podem ser categorizadas como SmartObjects (sensores, atuadores, gateways), Smart Mobile (dispositivo pessoal de usuário) e SmartServers (fornecedores de conteúdos e serviços).
- Realização de estudos de caso para mostrar e ajudar a melhorar o projeto.

Foram definidos papéis de segurança no nível de aplicação, que refletem os stakeholders participantes das interações em cada cenário. Os papéis definidos no projeto são[109]:

- **Usuário:** entidade que ganha acesso a um recurso. Normalmente é um humano, mas pode ser também uma aplicação;
- **Provedor de Recurso:** entidade que provê um recurso e opcionalmente o atualiza. Ele deve conferir o token de acesso apresentado para que possa prover/atualizar um recurso;
- **Consumidor de Recurso:** aplicação cliente recuperando e consumindo recursos;
- **Servidor de Autorização:** é a entidade que implementa a gestão de controle de acesso. É responsável pela autenticação do usuário e autorização do consumidor de recurso através da geração de um token de acesso, relacionado ao recurso que se deseja acessar. Opcionalmente, pode delegar a tarefa de autenticação para o servidor de autenticação;
- **Servidor de Autenticação:** esta entidade pode ser utilizada pelo servidor de autorização de modo a confiar em um protocolo de autenticação que não é implementado nativamente no servidor de autorização. Isso significa que o servidor de autenticação e o servidor de autorização precisarão fazer a federação de identidades de usuários.

A arquitetura do projeto é baseada nas arquiteturas IoT-A e FI-WARE. A figura 3.2, apresenta as quatro principais camadas definidas na arquitetura.

- **Communications Layer:** lida com a infraestrutura de comunicação fim-a-fim (com base em normas, tanto quanto possível), conectando objetos inteligentes (SmartObjects), dispositivos móveis (SmartMobiles) e plataformas de serviços (SmartObject Gateways e SmartServers).
- **Data/Context Management Layer:** especifica modelos de dados, interfaces e procedimentos de coleta e processamento de dados. Com informações de contexto, transforma os dados brutos em informações ricas.
- **Services Layer:** define componentes e interfaces para a descrição, descoberta, implantação e provisionamento de serviços sensíveis ao contexto.

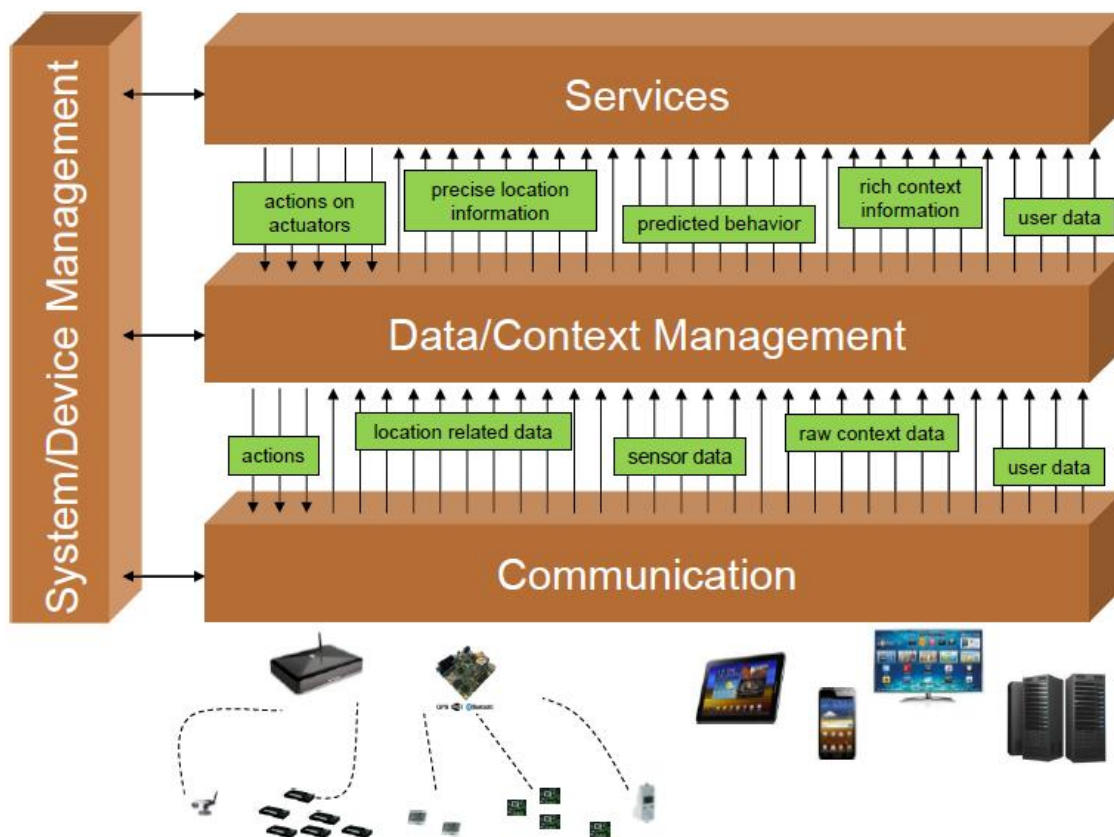


Figura 3.2 Arquitetura proposta por BUTLER [108]



- **System/Device Management Layer:** gerencia e mantém objetos inteligentes, serviços e outras entidades, como a configuração, gerenciamento de desempenho, ou diagnósticos.

### 3.4 LinkSmart (HYDRA)

O LinkSmart (anteriormente chamado Hydra), tem como objetivo desenvolver um middleware para sistemas embarcados inteligentes, baseado em uma arquitetura orientada a serviços, implementável em redes novas ou existentes, com ou sem fio, de dispositivos heterogêneos que operam com recursos limitados em termos de energia, poder de computação e uso da memória[110]. A arquitetura LinkSmart é baseada em três camadas: a camada física, a camada de middleware, e a camada de aplicação. O middleware HYDRA, foi testado em três domínios, tais como automação predial, área da saúde, e agricultura [111]). O usuário pode acessar os serviços oferecidos pelo HYDRA através de uma interface inteligente móvel.

Middleware LinkSmart é um software inteligente que é colocado entre as aplicações e o sistema operacional para lidar com várias tarefas de uma forma eficiente em termos de custos. Este middleware fornece uma interface de serviço web para interagir com todos os dispositivos físicos, atuadores, sensores ou subsistemas, independentemente de suas tecnologias de interface de rede, por exemplo, Bluetooth, RF, ZigBee, RFID, Wi-Fi, etc.

Este middleware foi projetado para facilitar a interação com dispositivos, abstraindo a partir das informações detalhadas sobre esses dispositivos e suas redes. O LinkSmart considera cada dispositivo como um serviço, e usa linguagens de ontologias, por exemplo, OWL, OWL-s e SAWSDL, para definir as descrições semânticas desses dispositivos. Além disso, ele fornece uma camada de serviço inteligente, que permite aos usuários finais interagirem com esses dispositivos, sem lidar com a tecnologia de comunicação que é suportado pelos dispositivos.

### 3.5 TinyDB

O middleware TinyDB[112] foi um dos primeiros projetos a propor a ideia de abstração dispositivos. O TinyDB permite que usuários finais interajam com os dispositivos



sem saber sobre o detalhes da especificação dispositivos, tais como os protocolos de comunicação que são suportado por esses dispositivos.

O projeto fornece uma linguagem de domínio específico (DSL) para usuários finais interagirem com os dispositivos. Sua DSL é uma linguagem de consulta que suporta seleção, junção, projeção, e agregação, para trabalhar com um ambiente de sensoriamento embarcado. Esta DSL permite que um usuário final obtenha informações sobre o tempo, lugar, tipo e método de amostragem em um ambiente de sensoriamento embarcado. TinyDB suporta os seguintes tipos de consultas:

- **Monitoring Queries:** Ela pede o valor de um ou mais atributos periodicamente e continuamente, tais como, informações sobre a temperatura.
- **Network Health Queries:** Ele fornece informações sobre a própria rede. Por exemplo, a seleção de nós vizinhos, com baixa vida útil de bateria.
- **Exploratory Query:** Ela mostra o estado de um nó específico ou de um conjunto de nós em um momento específico, tais como, por exemplo, selecionar a temperatura do sensor através da sua identificação.
- **Actuation Query:** Este tipo de consulta pode ser usada para pedir uma ação física. Por exemplo, um usuário final pode querer ligar um ventilador num ambiente em que a temperatura é superior a um limiar.

## 3.6 IoT@Work

Este projeto é focado na automação industrial, levando em considerações requisitos de comunicação e segurança. O projeto foi fundado pelo FP7 e é liderado pelo Siemens AG[113][114].

O projeto tem como objetivo reduzir custos operacionais na configuração, comissionamento, e manutenção da fabricação, principalmente diminuindo o tempo para adaptação a mudanças no sistema.

Com base nos resultados dos projetos de investigação realizados, o IoT@Work se concentra em melhorar a infraestrutura de comunicação e middleware para construir a auto-gestão e redes resilientes e arquiteturas de aplicativos orientados a serviços adaptados para ambientes de fábrica.

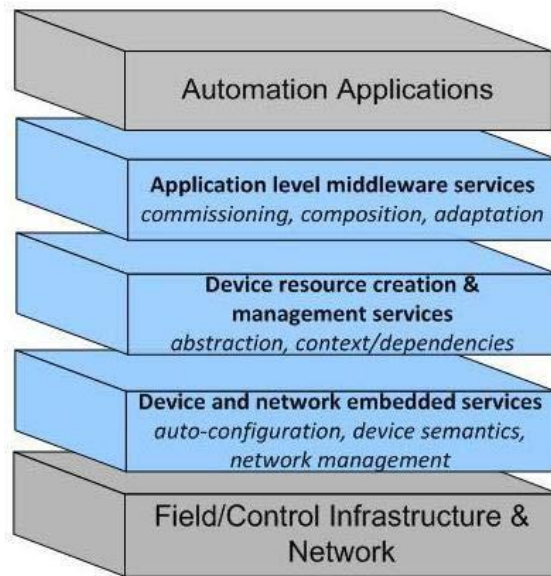
Os principais objetivos técnicos do projeto estão centrados em torno dos seguintes objetivos:

- A dissociação entre a aplicação de automação e a configuração de rede e operação, a fim de:
  - Fornecer serviços avançados de comunicações que atendem demandas da aplicação em termos de confiabilidade, comunicação em tempo real, escalabilidade e segurança.
  - Reduzir os efeitos do processo de reconfiguração da aplicação sobre o montante do planejamento manual necessária a nível da rede;
- Integrar mais auto-gestão em uma rede “Plug&Work”, a fim de:
  - Ativar “Plug&Work” em todos os níveis, especialmente durante a fase de configuração das redes de automação industrial;
  - Levar em conta a semântica da aplicação e os fluxos de trabalho na estruturação e otimização da operação da rede.
- Garantir a resiliência e segurança em sistemas de automação em execução, a fim de:
  - Suporte a cenários de fabricação adaptáveis e ágeis, ao mesmo tempo garantir e proteger a confiabilidade e a resiliência dos sistemas;
  - Integrar mecanismos de segurança fortes a nível arquitetônico e evitar acesso não autorizado e interferências indesejadas com o processo de produção.

### 3.6.1 Arquitetura

A arquitetura para este projeto foi desenvolvido em cooperação com IoT-A[114] e consiste de várias funções que são implementadas por vários componentes, que são agrupados três camadas principais, confirme a Figura 3.3.

**Device and network embedded services:** realizar funções de gestão, como a atribuição de identificadores, coletando semântica de dispositivos e contexto e gestão de interfaces de comunicação.



**Figura 3.3** Arquitetura IOT@Work - Camadas funcionais [114]

**Device resource creation & management services:** executar agregação e gestão dos recursos e serviços incorporados e funções, tais como o fornecimento de serviços de diretórios, abstração de redes e monitoramento do sistema de baixo nível e de gestão de segurança.

**Application level middleware services:** oferece suporte para aplicação por meio de serviços de middleware específicos para cenários da Internet das Coisas. Nesta camada, a lógica do aplicativo é interpretada através de configuração ou em tempo de execução e definição das interfaces com os diferentes componentes IoT .

### 3.6.2 Tecnologias Integradas

Descrição das principais tecnologias envolvidas na construção da arquitetura do IoT@Work[113].

- **Serviço de Diretório:** fornece um acesso unificado e baseado em padrões para acesso às informações, escondendo a complexidade e variedade de protocolos e formatos. Armazena informações que podem ser atualizadas através da API RESTful.
- **Auto-configuração de rede Ethernet em tempo real:** Atribuição de endereço IP e URL, descoberta, e configuração em tempo real.

- **Gerenciamento de Eventos (Serviço de Notificação de Evento):** é um componente de middleware que atua como um conector flexível e escalável entre fontes de eventos (ex.: *Publishers*) e consumidores de eventos (ex.: *Subscribers*).
- **Controle de Acesso:** O controle de acesso é apresentado em dois níveis: (1) controle de acesso granular para as coisas, agentes, aplicações, consumidores de dados, em todos os níveis e (2) controle de acesso para garantir a confiabilidade da comunicação e estado da configuração aos dispositivos embarcados.
- **Processamento de Eventos Complexos (CEP):** realiza processamento inteligente de mensagem (análise de falhas, manutenção preditiva), suporta a auto-gestão e permite a filtragem e combinação de eventos para criar uma nova funcionalidade (usando regras inteligentes).
- **Particionamento de Rede:** Ferramenta de gerenciamento de virtualização de rede.

## 3.7 Plataformas Comerciais

O grande potencial esperado para Internet das Coisas[2, 17, 16], tem despertado a atenção de grandes empresas, que vem expandindo seus serviços, muitos deles baseados em nuvem, para atender requisitos de projetos de Internet das Coisas. A seguir, é apresentada uma lista resumida das principais empresas de oferecem serviços para IoT.

### 3.7.1 Google

A Google vem investindo no cenário de IoT, e expandindo sua plataforma em nuvem, *Google Cloud Platform*, para atender os requisitos de IoT. Os principais serviços incorporados na sua plataforma, são destacados a seguir:

- **Google Cloud Pub/Sub:** É projetado para fornecer de mensagens assíncronas muitos-para-muitos de maneira confiável entre aplicações.
- **Device Streaming:** Oferece suporte para processamento, armazenamento e análise de centenas de milhões de eventos.

A aquisição da empresa Nest em fevereiro de 2014, por cerca de 3,2 bilhões de dólares, vem mostrando o direcionamento da empresa para áreas de computação embarcada e IoT. Outro projeto em desenvolvimento é o Brillo, que tem como objetivo fornecer um sistema operacional para dispositivos embarcados baseados em plataformas ARM, Intel x86, and MIPS, focado em dispositivos com memória RAM a partir de 32MB.

### 3.7.2 Oracle

Oferece uma plataforma[115] baseada em nuvem, para conectar, analisar, e integrar dispositivos, processos de negócios e aplicações. As principais recursos oferecidos estão relacionados à virtualização de dispositivos, comunicação bi-direcional, gerenciamento de metadados, processamento de eventos e *Big Data*.

### 3.7.3 Salesforce - IoT Cloud

A plataforma oferecida pela Salesforce[116], é um serviço baseado em nuvem, focado principalmente em processamento de eventos complexos integrados com processos de negócio. O projeto denominado Salesforce Thunder, é a peça central da plataforma, e é apresentado pela empresa, como o motor de processamento de eventos mais rápido.

### 3.7.4 IBM

A plataforma “IBM IoT Foundation”[117], permite que as organizações conectem dispositivos de forma fácil e segura, a partir de chips à dispositivos inteligentes. Escalando através de serviços baseados em nuvem, e usando análises ricas, a plataforma fornece às organizações uma nova visão de inovação e transformação.

Outro projeto liderado pela empresa é o “Watson Internet of Things”, que tem o foco na inteligência computacional de cognição e inferência.

### 3.7.5 Amazon IoT

O AWS IoT[118] é uma plataforma que permite conectar dispositivos aos serviços da AWS e a outros serviços. Permite interação, processamento dos dados dos dispositivos e

integração com aplicações, mesmo quando eles estiverem off-line. A empresa oferece um SDK (AWS IoT Device SDK), que permite que os dispositivos facilmente se conectem à nuvem usando protocolos MQTT ou HTTP, suportando dispositivos como Arduino e linguagens C e JavaScript.

### 3.7.6 Microsoft

A recente parceria entre Microsoft e Arduino[119], demonstra a aproximação da empresa na construção de projetos de IoT e o apoio à projetos open source. A empresa possui projetos tanto a área de sistemas embarcados, com o sistema operacional Windows 10 IoT Core, compatível com Raspberry Pi, quando para serviços em nuvem, com o Azure IoT Suite[120].

### 3.7.7 Intel

A Intel é outra empresa que vem apostando fortemente no mercado de IoT, contando com projetos para dispositivos embarcados e soluções em nuvem. Na perspectiva de projetos cloud a empresa oferece o “Intel® IoT Platform”[121], com o objetivo de interconectar dispositivos de forma segura e escalável, permitindo a análise e extração de valor dos dados.

Na área de dispositivos embarcados a empresa oferece kits de desenvolvimento que contam com a placa Galileo, com compatível e certificada pelo Arduino<sup>1</sup>, e a placa Intel® Edison<sup>2</sup>, também compatível com Arduino e de fácil integração aos serviços Microsoft Azure IoT Suite e Amazon AWS.

### 3.7.8 Xynvely

A plataforma Xively[122], desenvolvida pela empresa LogMeIn, utiliza serviços de nuvem para gerenciar dados providos por dispositivos. A plataforma fornece uma API para envio de dados a partir dos sensores, permitindo assim a visualização de dados históricos e provendo mecanismos para disparar eventos com base nos dados gerados

---

<sup>1</sup><https://www.arduino.cc/en/ArduinoCertified/IntelGalileo>

<sup>2</sup><https://software.intel.com/pt-br/iot/hardware/edison>

pelos sensores (os chamados triggers). Na plataforma, os dados são organizados em feeds, datapoints e datastreams.

## 3.8 Considerações Finais

### 3.8.1 Análise das Plataformas Abertas

Os projetos selecionados para análise tem como característica em comum as capacidades de abstração de hardware, código fonte disponível, e o fato de terem sido desenvolvidos recentemente. O TinyDB e as plataformas comerciais não serão incluídos nessa análise.

- Disponibilidade de documentação e código fonte:
  - O(s) projeto(s): BUTLER, IoT@Work e LinkSmart, são projetos que apesar de terem código fonte disponível, não possuem informações de como realizar o processo de compilação, ou mesmo, não é disponibilizado o código de todos os componentes, impossibilitando a análise e testes aprofundados.
  - O(s) projeto(s): OpenIoT e Eclipse IoT, possuem boa quantidade de documentação, guias de instalação e o código de todos componentes são acessíveis (github). Porém os dois possuem um processo de “setup” relativamente complexo.
- Abstração do Hardware:
  - Todos os projetos avaliados atendem bem a este requisito. No Eclipse IoT ele é implementado pelo sub-projeto chamado Leshan<sup>3</sup>, focado na comunicação M2M e CoAP.
- Integração com plataformas de hardware mencionadas na seção 2.3:
  - O(s) projeto(s): Eclipse IoT, é um dos poucos a dar ênfase nessas plataformas, porém, devido o requisito anterior, existem algumas lacunas a serem abordadas.
- Complexidade no desenvolvimento de projetos:

---

<sup>3</sup><http://www.eclipse.org/leshan/>

- O(s) projeto(s): BUTLER, IoT@Work e LinkSmart, não puderam ser avaliados conforme a complexidade do desenvolvimento, pois não possuem instaladores, nem foi possível a compilação a partir dos códigos fonte.
- O(s) projeto(s): Eclipse IoT e OpenIoT, devido à grande quantidade de componentes, possuem um processo de compilação complexo e demoraram para serem configurados. O Eclipse IoT é o mais favorável neste quesito, apesar de termos encontrado algumas falhas nos testes iniciais.
- Ferramentas para auxílio na construção das aplicações embarcadas (firmware):
  - O(s) projeto(s): Eclipse IoT, possui subprojetos WAKAAMA e Leshan, que possuem recursos e bibliotecas em C para desenvolvimento para microcontroladores, porém o mesmo, necessita de 100kb de flash e 10kb de RAM. O sub-projeto Eclipse Paho, disponibiliza bibliotecas compatíveis com o Arduino para comunicação usando MQTT.
- Ferramentas de visualização e interface com os dispositivos:
  - O(s) projeto(s): OpenIoT, oferece interfaces avançadas para configuração de dispositivos, composição e orquestração de serviços. O projeto Eclipse IoT, mais especificamente o sub-projeto Leshan, possui alguns recursos simples para interação com os dispositivos.
- Abstração de comunicações: Bluetooth, USB, Ethernet, WiFi:
  - A maioria dos projetos estão voltados para comunicação usando protocolo IP, com exceção do Eclipse IoT (subprojeto Kura), que possui implementações para comunicação USB e Bluetooth.
- Auxílio na construção de aplicações Web:
  - O(s) projeto(s): Eclipse IoT, possuem implementações de clientes MQTT em JavaScript no sub-projeto Paho, porém não possui nenhuma implementação para abstração de dispositivos na camada Web em JavaScript.
- Auxílio na construção de aplicações Mobile (Android):



- O(s) projeto(s): Eclipse IoT, possui apenas implementação para clientes MQTT, e no projeto OpenIoT, foram encontradas apenas interfaces gráficas de visualização de dispositivos, nenhuma ferramenta específica para desenvolvimento.

#### 3.8.2 Análise das Plataformas Comerciais

Não é objetivo desta dissertação o aprofundamento na análise de plataformas proprietárias, limitando-se apenas a algumas considerações.

As plataformas proprietárias oferecem um requisito importante para projetos de IoT, principalmente, quando os mesmos necessitam trabalhar com uma grande quantidade de dispositivos, que está relacionado à escalabilidade. A maioria das soluções abordadas neste trabalho, são de empresas que oferecem outros serviços relacionados a *cloud computing*, que por natureza, necessitam de uma infraestrutura altamente escalável. Por outro lado, essas plataformas comerciais precisam estar baseadas em protocolos abertos para sua ampla difusão e penetração do mercado de IoT.

As empresas que mais se destacam no desenvolvimento e apoio de padrões abertos são a Amazon AWS, Microsoft (contrariando as expectativas) e Intel. Estas empresas, também oferecem suporte para os hardwares abertos (como Arduino), e bibliotecas para a integração com seus serviços em nuvem.

A Google, na sua plataforma, parece estar direcionada a usar seus próprios padrões<sup>45</sup>, e até o momento não oferece suporte ao MQTT.

---

<sup>4</sup><http://venturebeat.com/2015/05/28/google-announces-brillo-os-for-the-internet-of-things/>

<sup>5</sup><https://cloud.google.com/pubsub/docs>

# 4

## Arquitetura Proposta

Este capítulo apresenta a arquitetura empregada na construção do OpenDevice. A arquitetura proposta será apresentada em uma visão top-down (de cima para baixo), onde partiremos de uma abordagem em alto nível até um nível mais baixo, apresentando detalhes de implementação. Na primeira seção (4.1), será apresentada a visão geral da arquitetura, permitindo o entendimento de suas camadas, modelos de comunicação, requisitos e extensibilidade. Na seção 4.2, será apresentada uma visão mais detalhada dos componentes da arquitetura, detalhando os módulos que compõe a arquitetura e responsabilidades. As seções 4.3, 4.4 4.5 e 4.12 apresentam os detalhes de como é realizada a abstração dos dispositivos e nas seções 4.7 e 4.11, são apresentados os recursos que permitem que as aplicações clientes se comuniquem com os dispositivos físicos, utilizando por exemplo o protocolo MQTT. A seção 4.6, apresenta os mecanismos de extensibilidade que a plataforma oferece, em complemento ao framework de conexões que é apresentado na seção 4.6.1. Na seção 4.13 são apresentados os detalhes da arquitetura utilizada na construção do firmware, um componente importante que permite a criação de dispositivos (sensores e atuadores) para internet das coisas, utilizando componentes de baixo custo, de maneira simplificada e extensível, e com suporte a várias tecnologias de comunicação. Um protocolo simples e fácil de ser implementado é proposto na seção 4.15, para permitir a integração entre software e hardware com baixo poder de processamento.

## 4.1 Visão Geral

O OpenDevice é uma plataforma aberta (*open source*) que tem como objetivo fornecer uma solução completa para a criação de projetos baseados na Internet das Coisas. Suas ferramentas abrangem todas as plataformas envolvidas no ecossistema de IoT: (1) Hardware, (2) Desktop, (3) Cloud, (4) Mobile, (5) Web, promovendo uma infraestrutura de comunicação entre todas essas camadas, bem como serviços de: (1) Armazenamento, (2) Controle, (3) Configuração, (4) Visualização. A base da arquitetura foi construída usando a linguagem de programação Java, e por ser multi-plataforma, vários componentes podem ser reutilizados em várias plataformas. Devido à limitação de recursos de processamento e memória de alguns dispositivos embarcados alvos desse projeto, como no caso dos microcontroladores AVR/Arduino, um protocolo de nível de aplicação foi elaborado, implementado e disponibilizado através de bibliotecas em C/C++. Hardwares mais robustos, como no caso do Raspberry, Beaglebone ou outro dispositivo que tenha uma implementação da JVM disponível, podem executar as implementações em Java diretamente. O OpenDevice oferece mecanismos para implementar aplicações simples ou tratadores de eventos diretamente em JavaScript, que executam no lado do servidor, algo similar ao Node.js.

Nesta seção iremos apresentar uma visão macro da arquitetura e na seção seguinte (4.2) uma visão mais detalhada. Analisando a figura 4.1, podemos observar a integração dos componentes gerais do projeto, como veremos mais adiante na seção 4.1.2, vários modelos de comunicação (layouts) podem ser utilizados, de acordo com os requisitos de cada aplicação. Projetos para a Internet das Coisas têm por característica principal lidar com uma grande quantidade de atuadores e sensores heterogêneos, a camada do Firmware é responsável por oferecer um nível mais alto de abstração dos dispositivos (atuadores e sensores), já que esses podem utilizar diversos protocolos e tratamentos de dados variados. A integração do firmware com o middleware ou aplicações, ou seja, a integração entre software e hardware, é um desafio, pois os protocolos ainda estão em fase de desenvolvimento e validação. Devido a este problema a arquitetura tanto do middleware como do firmware foi projetada para atender novos requisitos e ter uma fácil extensibilidade. Apesar de não se ter um padrão definido, os principais padrões e tecnologias de comunicação foram avaliados e implementados dentro da arquitetura.

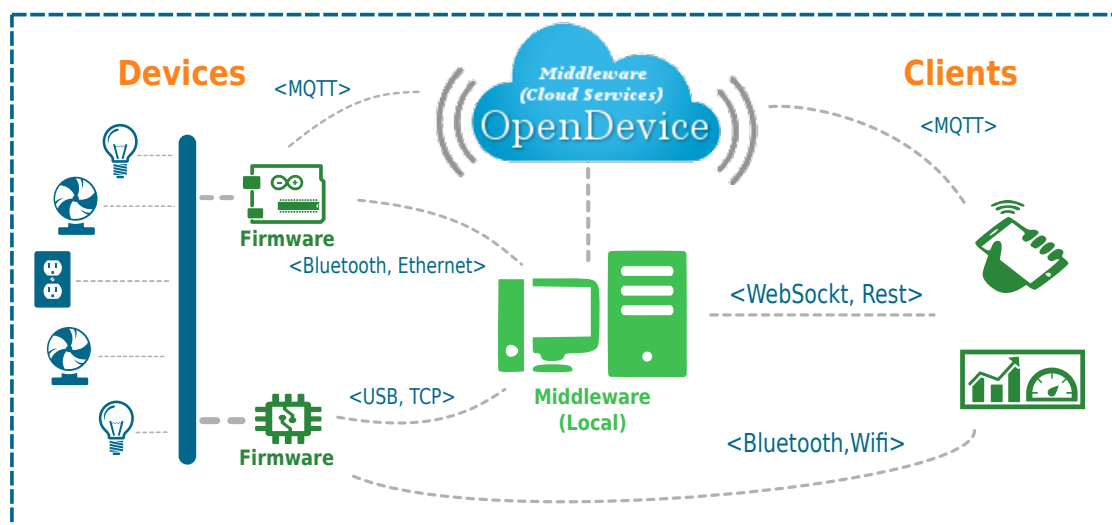


Figura 4.1 Visão Geral

### 4.1.1 Componentes da Visão Geral

- **Middleware (Servidor)** - O middleware tem um papel fundamental em projetos de IoT, como mencionamos na seção 2.8. No OpenDevice ele tem o papel de oferecer serviços para as aplicações clientes, fazer o gerenciamento dos dispositivos, gerenciar múltiplas conexões, fazer armazenamento e dispõe de módulos para visualização dos dados através de dashboards dinâmicos e gráficos em tempo-real ou históricos. Ele foi desenvolvido usando uma estrutura modular e extensível, permitindo a inclusão de novos componentes e plug-ins de maneira simplificada. Os desenvolvedores podem optar por utilizá-lo como um servidor à parte, de modo embarcado ou estendendo-o. Esse último é o modo aconselhado caso esteja desenvolvendo aplicações na linguagem Java, pois sua arquitetura foi pensada como um framework, de modo que os desenvolvedores de projetos de Internet das Coisas incluam apenas as regras de negócio, sem se preocupar com os detalhes de baixo nível. Projetos escritos em outras linguagens de programação podem utilizar as APIs REST, MQTT, Socket e WebSocket para se comunicar com os dispositivos através do middleware, que pode ser implantado em um servidor local (PC / Raspberry Pi) ou na nuvem. O OpenDevice suporta a criação de aplicações em JavaScript, que executam diretamente na JVM (Java Virtual Machine), o que permite acesso aos módulos Java e a criação de interfaces gráficas usando JavaFx.
- **Firmware** - O firmware tem o papel de implementar o protocolo do OpenDevice e

fazer o gerenciamento dos dispositivos físicos (atuadores e sensores) ligados a ele, criando uma abstração de alto nível, e facilitando a integração com a camada de software. Nele, os dispositivos (sensores e atuadores) são configurados e mapeados para um pino específico, de modo que apenas as informações do dispositivo (ID, Nome, Tipo) são expostas para as APIs externas, permitindo assim uma maior abstração dos detalhes do hardware, ou até mesmo a substituição do hardware por outro sem alterações na aplicação. Podemos pensar no firmware também como um *gateway*, responsável por manter a comunicação com o middleware ou aplicação e controlar os dispositivos físicos. É um componente de software projetado para rodar em dispositivos embarcados com baixo poder de processamento e memória, algo em torno de 2KB de RAM. O foco inicial do desenvolvimento foram os microcontroladores encontrados em plataformas de prototipação como o Arduino e similares. Com a expansão e popularidade da plataforma do Arduino inúmeros hardwares estão dando suporte as suas APIs[11, 12], ampliando a compatibilidade do firmware desenvolvido. Na seção 5.1, serão apresentados os hardwares testados. A arquitetura do firmware é extensível, permitindo incluir novos dispositivos, novos comandos, e suporte a novos tipos de conexões. Os detalhes do protocolo do OpenDevice serão apresentados na seção 4.15. O Firmware é um componente dispensável quando o projeto utilizar hardwares com um maior poder de processamento e que tenham suporte a GPIO, como no caso Raspberry ou BeagleBone.

- **Devices** - Representam os dispositivos físicos que podem ser atuadores (representado pela classe **Device**) ou sensores (representados pela classe **Sensor**). Estão organizados nos seguintes tipos: (1) ANALOG, (2) DIGITAL, (3) CHARACTER, que estão ligados ao modo de operação e tipo de dado suportado. Dentro do protocolo os dispositivos são identificados através de um código, denominado DeviceID. Os dispositivos do tipo ANALOG, podem receber uma faixa de valores numéricos, já os dispositivos do tipo DIGITAL trabalham com dois estados: 0 (desligado) e 1 (ligado), os dispositivos do tipo CHARACTER, estão aptos a receber uma String. O OpenDevice trabalha com um modelo orientado a objetos, permitindo que uma chamada dos métodos do *Device* na aplicação cliente, como por exemplo *Device1.on()*, acenda uma lâmpada real ou o realize fechamento de uma garra robótica. Eles podem ser independentes ou estarem conectados a um microcontrolador, executando o firmware, que faz o papel de Gateway. Os desenvolvedores podem estender essa abstração e adicionar novos comportamentos para os dispositivos e

sensores.

- **Clientes** - Representam as aplicações clientes, que podem ser aplicações Desktop, web ou *mobile* e podem ser desenvolvidas em qualquer linguagem. As aplicações clientes, podem se comunicar com o middleware, através das interfaces ofertadas (REST, MQTT, Socket, WebSocket e etc.) ou diretamente com os dispositivos físicos. Foram desenvolvidos módulos de bibliotecas clientes que permitem a integração com o middleware em linguagens Java e JavaScript e experimentos de integração usando a linguagem python. Mais detalhes sobre estas implementações serão vistas na seção [4.11](#).

### 4.1.2 Modelos de comunicação

A arquitetura planejada permite desenvolver projetos em vários Layouts e modelos de comunicação, permitindo atender desde aplicações locais, que se comunicam diretamente com os dispositivos, até aplicações distribuídas, com comunicação através da internet.

- **Comunicação direta** - É um modelo que permite a comunicação direta entre a aplicação final e os dispositivo físicos. Tem a característica de ser mais simples, pois neste modelo, não se faz necessária a presença do middleware (servidor). A aplicação neste cenário pode ser representada por: (1) um dispositivo mobile, (2) uma aplicação desktop ou (3) uma aplicação web. Representando o dispositivo físico, podemos ter um hardware que disponibilize um mecanismo de comunicação embarcado, por exemplo o ESP2866, que possui Wi-Fi, ou por exemplo um Arduino com um módulo Bluetooth acoplado. Estes dois componentes podem se comunicar usando diversas tecnologias, como: USB, Bluetooth, Ethernet, Wi-Fi. Mais detalhes sobre os meios de comunicação e como eles são implementados, serão vistos nas seções [4.13](#) e [4.13.3](#).
- **Comunicação local (Middleware)** - No modelo de comunicação local, entre em cena um novo componente do OpenDevice, o middleware. O middleware quando implantado dentro de um projeto pode ser visualizado como o servidor, e pode ser configurado tanto em um computador convencional, como em um mini-pc (ex.: Raspberry Pi). A vantagem da inclusão deste elemento é que ele permite que diversas aplicações se comuniquem com o mesmo dispositivo. Por exemplo, caso uma aplicação mobile esteja conectada via Bluetooth com um dispositivo,

outra aplicação será impedida de se comunicar com esse dispositivo, usando middleware, essa limitação é contornada, já que o middleware recebe os comandos das aplicações cliente e faz o redirecionamento para o dispositivo desejado. Outra vantagem é que o middleware pode gerenciar várias conexões com os dispositivos, utilizando vários meios de comunicação, liberando essa carga de gerenciamento das aplicações. Neste modelo de comunicação, os dispositivos podem operar no modo servidor, aguardando a conexão por parte do middleware, ou no modo cliente.

- **Comunicação pela Internet** - Neste modelo as aplicações podem se comunicar com os dispositivos através da internet. Para isso, os dispositivos devem possuir um hardware que suporte uma conexão usando o protocolo TCP/IP, necessitando apenas de um roteador convencional para interligação com a internet ou um modem GSM/GPRS. Neste cenário os dispositivos atuam no modo cliente e o middleware está implantado em um servidor na nuvem.
- **Comunicação pela Internet, usando um middleware local** - Neste modelo um middleware local é aplicado novamente, permitindo que as aplicações continuem funcionando caso a internet não esteja disponível ou quando é necessário integrar dispositivos que não possuem suporte o protocolo TCP/IP. Neste modelo, a mesma versão do middleware está rodando em um servidor local e em um servidor na nuvem, diferenciando apenas os módulos e infraestrutura utilizada, já que em um servidor local a memória e recursos são limitados e num servidor de nuvem é necessário uma performance e alta escalabilidade.

### 4.1.3 Requisitos

A arquitetura foi projetada para ser adaptável às capacidades e necessidades de casos de uso específicos. Esses podem ser categorizados como:

- **Requisitos de Comunicação** - O sistema deve ser apoiado em eventos e/ou comunicação autônoma. Os dispositivos devem ser configurados e controlados remotamente. O sistema deve suportar comunicação em tempo-real. O sistema deverá fornecer comunicação segura e confiável. O sistema deve prover recursos para extensão dos protocolos de comunicação.
- **Gerenciamento de dispositivos** - A API deve prover uma interface para o controle

dos dispositivos. Isso inclui a configuração do dispositivo bem como ativação, desativação e atualização remota.

- **Serviços de Descoberta** - O sistema deve oferecer mecanismos para descoberta e vinculação de novos dispositivos.
- **Capacidades do dispositivo** - A API deve prover informações sobre as capacidades dos dispositivos.
- **Requisitos de comunicação cliente/servidor** - A API deve prover suporte para operar os dispositivos tanto no modo cliente como no modo servidor.
- **Requisitos de monitoramento de status** - Status como nível de bateria, temperatura, estado de operação dentro da infraestrutura devem estar acessíveis.
- **Serviço de Armazenamento** - A API deve oferecer recursos para armazenamento das informações sobre os dispositivos, bem como mecanismo para obter o histórico dos dados do dispositivo.
- **Serviço de Visualização** - A API deve oferecer serviço para análise dos dados, recursos para consultas históricas, funções para agrupamento e agregação dos dados, bem como componentes visualização através de gráficos.
- **Orientado a Eventos** - O sistema deve oferecer um sistema para tratamento de eventos, notificando as partes interessadas quando alguma mudança de estado ocorrer nos dispositivos.
- **Interoperável entre várias redes (PAN, LAN e WAN)** - Precisa trabalhar através de uma variedade de redes e protocolos, tanto com redes IP e não-IP, incluindo dispositivos de baixa potência (low-power) em redes como Z-Wave, Zigbee e Bluetooth.
- **Extensível** - Deve fornecer recursos que permitam a inclusão de novos componente e funcionalidades através de extensões ou plug-ins.
- **Independência de Plataforma** - A API de serviços deve ser multi-plataforma, executando nos principais sistema operacionais encontrados no mercado.



#### 4.1.4 Extensibilidade

Toda a arquitetura do OpenDevice foi pensada visando uma fácil extensibilidade, permitindo inclusão de novos protocolos, novos módulos de comunicação e integração com outras ferramentas. Devido à grande diversidade de áreas, requisitos e domínios variados que projetos de Internet das Coisas podem ser empregadas, e por ser uma área relativamente nova, é uma tarefa complexa desenvolver uma plataforma/Framework que atenda a todos os requisitos. Esse trabalho oferece contribuições com uma base sólida para criação de outros projetos especializados para outros domínios como automação residencial, saúde, cidades inteligentes e etc, porém sua estrutura generalista pode ser empregada para criar vários projetos sem necessidade de modificações, no capítulo 5 será realizada uma avaliação experimental, usando como base o domínio da automação residencial para validar a arquitetura, com base na sua aplicação generalista e nas suas capacidades de extensibilidade.

No contexto de extensibilidade, foram analisadas algumas estratégias de implementação de suporte a plug-ins e módulos dinâmicos, uma das soluções mais promissoras nesse campo é o OSGI (Open Services Gateway Initiative)[123], porém foi descartado por considerarmos que é uma ferramenta que adiciona uma complexidade extra no desenvolvimento das extensões e necessita de um gerenciamento complexo que é feito pelo contêiner de OSGI, consequentemente consumindo mais recursos. A solução adotada é baseada em uma ferramenta disponível pela própria linguagem Java, o SPI (Service Provider Interfaces), que tem como objetivo, de oferecer recursos de extensão de forma simples e leve, baseando-se apenas em interfaces que são definidas pelo próprio OpenDevice e um arquivo de configuração simples. Uma pequena desvantagem encontrada no mecanismo do SPI é que ele não permite o carregamento dinâmico de plug-ins em tempo de execução, apenas no carregamento da aplicação.

## 4.2 Arquitetura detalhada

Nesta seção, veremos os detalhes da arquitetura empregada na construção do projeto OpenDevice, analisando os módulos individualmente, os blocos funcionais e suas responsabilidades.

Uma das considerações importantes no desenvolvimento desse projeto é que o core

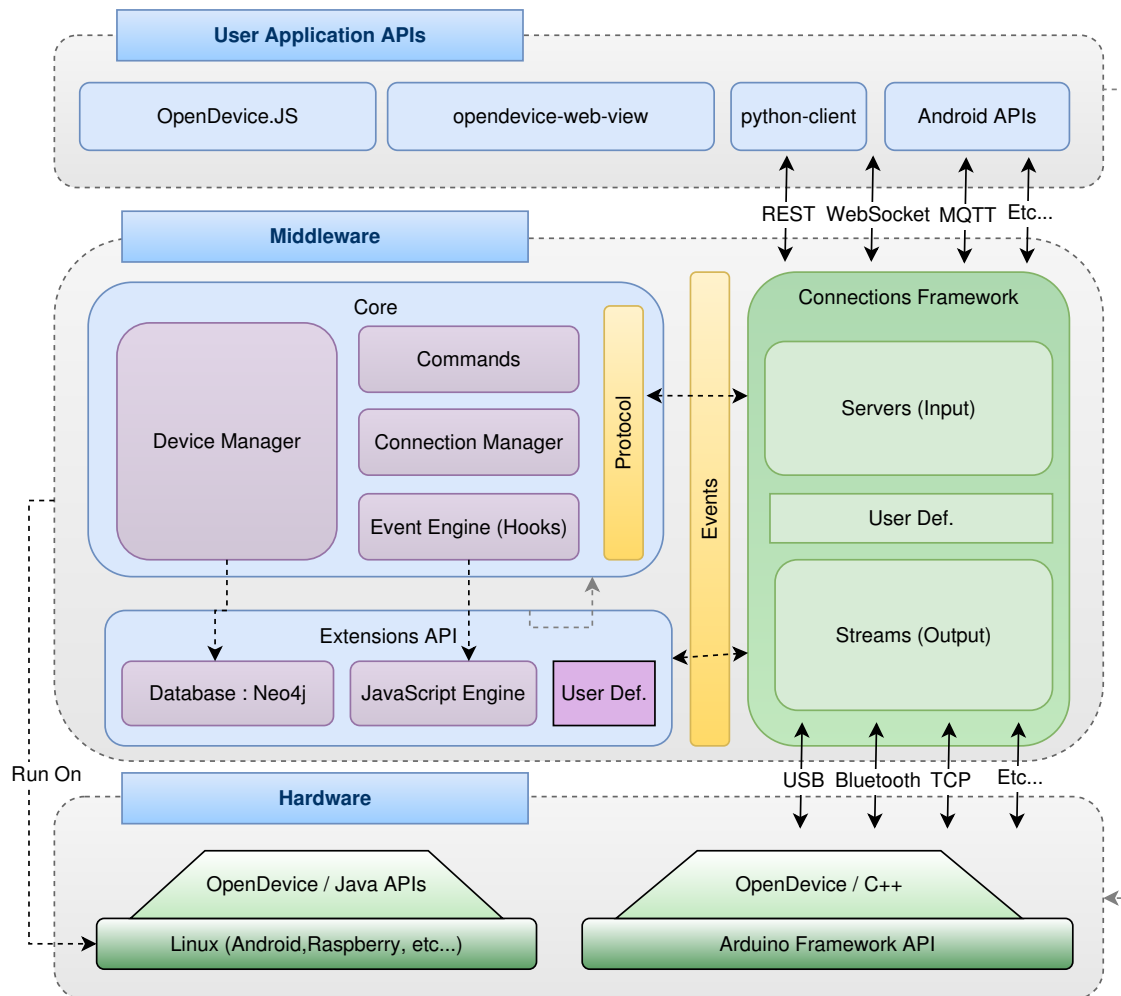
da arquitetura e os módulos servidores principais (MQTT, Rest e WebSocket) pudessem ser executados em hardwares de baixo poder de processamento, algo em torno de 512MB de RAM e 500Mhz de CPU. Com base nessa restrição, foram desenvolvidos módulos de servidores que executam em modo embarcado(*embedded*), já que as soluções disponíveis de servidores Java como: Tomcat , Jetty, JBoss ou GlassFish, iriam consumir muitos recursos da máquina. O mesmo critério foi aplicado na seleção do banco de dados, que é um componente opcional. Soluções embarcadas foram adotadas em relação à soluções instaladas separadamente (ex.: MySQL), facilitando o desenvolvimento e distribuição da aplicação.

A camada do middleware, das aplicações clientes e firmware são baseadas no modelo de desenvolvimento orientado eventos (*Event-Driven*), realizada através do envio e recebimento de comandos, usando comunicações em tempo-real. O modelo baseado em eventos facilita o desenvolvimento de aplicações de IoT, principalmente quando é necessária a interação com sensores, permitindo que os desenvolvedores registrem que tipo de evento ou os dispositivos que desejam monitorar, e quando o evento ocorrer, como por exemplo um sensor mudar seu valor, os interessados no evento serão notificados. Esse modelo também permite uma fácil extensão da ferramenta, pois tira a responsabilidade das extensões de conhecer fluxo de conexão e aspectos internos do funcionamento, podendo agregar funções mais elaboradas para lidar com os eventos, como por exemplo, um algoritmo de inteligência artificial (IA) que faça previsão.

Na Figura 4.2 pode-se observar a arquitetura e, cada camada, assim como, cada elemento será explicado a seguir.

### 4.2.1 Camadas da Arquitetura

- **Camada de Aplicação (User Application APIs)** - Constituem os módulos e bibliotecas disponibilizados para utilização pelas aplicações clientes, permitindo a integração com o OpenDevice. A maioria dos módulos são projetados para que as aplicações se comuniquem com os dispositivos físicos (hardware) através do middleware, porém estão disponíveis módulos que permitem a comunicação direta entre a aplicação cliente e o hardware. Foram desenvolvidos módulos clientes para Web, Desktop e Android, os detalhes da implementação e tecnologias suportadas serão abordados na seção 4.11.



**Figura 4.2** Arquitetura detalhada

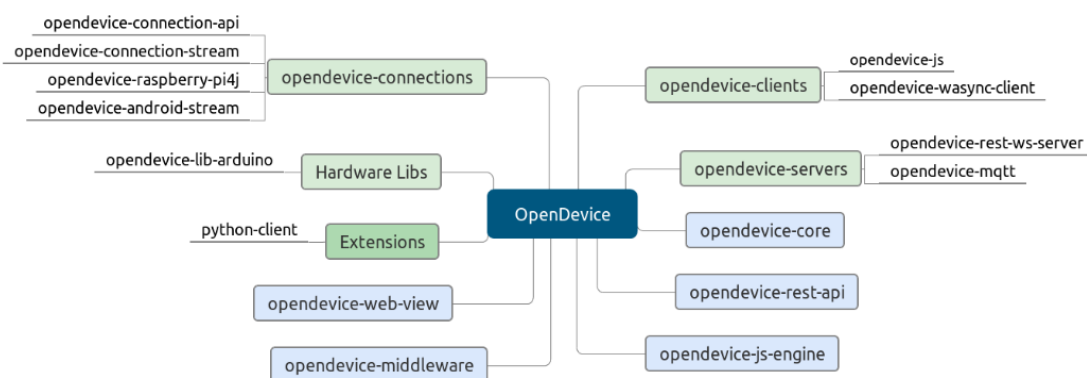
- **Middleware** - O middleware é uma camada altamente modular e customizável, que oferece uma série de serviços para as aplicações, como mencionamos na seção 4.1.1 (Componentes da Visão Geral). Ele é a peça central que permite a comunicação das aplicações com os hardwares utilizando uma linguagem de alto-nível. O middleware foi desenvolvido para uma fácil extensão, devido a essa característica, ele se torna um framework para criação de projetos de Internet das Coisas. Conta com um poderoso framework de conexões, responsável pelas definições do protocolo, comunicação com os dispositivos físicos e integração com as aplicações. Mais detalhes e sub-componentes serão abordados a seguir.
- **Hardware** - Os hardwares podem ser classificados em microcontroladores e Mini PCs. Para os microcontroladores são disponibilizadas bibliotecas, que chamamos nesse trabalho de firmware, que permitem uma fácil integração com o middleware (servidor) e facilitam a criação de objetos inteligentes. Elas dão suporte a utilização de várias tecnologias de comunicação, como: Usb, Bluetooth, Ethernet e Wi-Fi. Essas bibliotecas são baseadas no framework do Arduino, o que as tornam compatíveis com uma série de Hardwares e plataformas de prototipação, inclusive que não fazem parte do projeto do Arduino[11, 12, 13]. Quando se trata de Mini PCs, que envolvem hardwares de maior poder de processamento e memória, como por exemplo, Raspberry Pi e BeagleBone, é possível executar o middleware diretamente neles, desde que se tenha disponível uma implementação da JVM para esses dispositivos. Nos Mini PCs, o acesso aos pinos de GPIO ainda é um problema, pois cada hardware possui suas especificações. O projeto Device I/O [39], mantido pela comunidade do OpenJDK, tem a proposta de criar uma implementação para o acesso aos periféricos desses dispositivos, porém ainda está em fase de desenvolvimento. Para hardwares não suportados pelo projeto, existem três alternativas: (1) criar adaptadores/Wrapper para bibliotecas já existentes, (2) implementar chamadas JNI ou (3) usar o drivers baseados em *Sysfs* que alguns Kernels disponibilizam para acessar a GPIO como fossem simples arquivos[124].

### 4.2.2 Módulos

Nesta seção, abordaremos os módulos que compõe a arquitetura. Na Figura 4.3 pode-se observar os módulos, assim como, cada elemento será explicado a seguir.

#### 1. Módulos Gerais

---

**Figura 4.3** Módulos

- (a) CORE: Módulo base da arquitetura, com o sistema de gerenciamento de dispositivos, sensores, conexões, eventos, armazenamento, API de comandos e implementação do protocolo. Esse módulo pode ser usado no desenvolvimento de aplicações Desktop, Web ou Mobile;
- (b) REST-API: Definições das interfaces REST para controle dos dispositivos e sensores;
- (c) JS-ENGINE: Implementação do suporte a execução de JavaScript no lado do servidor;
- (d) WEB-VIEW: Interface HTML/5 + AngularJS + OpenDeviceJS;
- (e) MIDDLEWARE: Aplicação de gestão, controle e monitoramento, que usa a maior parte dos módulos do OpenDevice, usando o banco de dados Neo4J + Hibernate OGM (JPA).

## 2. Módulos do framework de conexões

- (a) CONNECTION-API: Especificação das interfaces de conexão cliente/servidor;
- (b) CONNECTION-STREAM: Implementações de conexões USB, Bluetooth, TCP (PC/RaspPI);
- (c) ANDROID-STREAM: Implementação de conexões USB, Bluetooth para Android<sup>1</sup>;

---

<sup>1</sup>

i. Demais conexões (Rest, WebSocket, MQTT) podem ser utilizada no Android através dos outros módulos.

- (d) RASPBERRY-PI4J: Comunicação com a GPIO do Raspberry usando PI4J.

### 3. Módulos Cliente

- (a) OPENDEVICE-JS: Biblioteca JavaScript com suporte a WebSocket e REST;
- (b) OPENDEVICE-WASYNC-CLIENT: Biblioteca WebSocket para Android e PC;
- (c) PYTHON-CLIENT: Biblioteca em Python com suporte a TCP.

### 4. Módulos Servidores

- (a) REST-WS-SERVER: Servidor REST e WebSocket;
- (b) OPENDEVICE-MQTT: Servidor MQTT;

### 5. Bibliotecas para hardware

- (a) opendevicelib-arduino: Bibliotecas em C++ baseadas na API do Arduino, que implementa o protocolo do OpenDevice e são usadas para criação do firmware. Provê suporte ao gerenciamento de dispositivos e conexões: USB, Bluetooth, Wi-Fi, Ethernet. Veja a lista de placas testadas na seção [5.1](#).

## 4.3 Gerenciamento de Dispositivos

Um dos principais requisitos de uma arquitetura de Internet das Coisas é realizar a abstração dos dispositivos, permitindo ligar com a sua grande heterogeneidade. No OpenDevice as abstrações base são implementadas através das classes *Device* e *Sensor*. Algumas implementações de clientes sofrem algumas variações nessa abstração, como por exemplo no cliente JavaScript OPENDEVICE-JS, onde existe apenas a classe *Device* e a identificação, se é um sensor ou atuador, é feita através de um atributo, já que nessa linguagem não temos suporte a orientação a objetos.

O OpenDevice permite a conexão com vários hardwares ao mesmo tempo, cada hardware (ex.: Arduino) pode gerenciar vários sensores e atuadores, cada sensor e atuador é interpretado como um “*Device*” e recebe um ID (*DeviceID*) único na plataforma, que pode ser codificado manualmente ou dinamicamente. Quando o módulo cliente ou o middleware estabelece uma conexão com o hardware (ex.: Arduino), ele solicita as definições dos dispositivos que foram configurados. A biblioteca (firmware) instalada

no hardware, cuida de todo o processo de negociação. A configuração de dispositivos no hardware pode ser feita de forma estática, através de uma pre-configuração, ou dinâmica, através de comandos. No hardware, os dispositivos são mapeados de forma a vincular o pino do microcontrolador com um ID (`DeviceID`), de modo que as aplicações externas conheçam o apenas ID, criando uma abstração do hardware final, permitindo mudanças sem afetar a aplicação. Os hardwares, atuam como um Gateway, podendo ser identificados através de um nome ou ID, e seriam responsáveis por controlar sensores e atuadores, e integra-los às aplicações.

A listagem 4.1 apresenta um exemplo (em Java) da configuração dos dispositivos e conexão. Ao instanciar uma classe `Device` dentro de uma classe que estende *LocalDeviceManager*, eles passam a ser gerenciados pelo `OpenDevice`, e qualquer alteração dos valores dos dispositivos (ex.: `led.on()` e `led.off()`), resulta em um envio de um comando para o hardware, que verifica o ID do dispositivo e faz o mapeamento para o pino correspondente. No lado do hardware/firmware (listagem 4.2), a configuração dos dispositivos foi realizada de forma estática, onde foram adicionados dois dispositivos: (1) um atuador digital (led), conectado no pino 5 do Arduino e (2) um sensor digital (switch), conectado no pino 3. A associação do ID para cada dispositivo foi realizada de forma automática e sequencial, porém é possível especificar um ID manualmente.

Ao pressionar o sensor físico (ID=2), o firmware reconhece a alteração no seu estado e envia uma notificação para a aplicação (ou middleware), que chama o evento “onChange” do dispositivo especificado e notifica outros componentes (incluindo extensões) que foram registrados para esse evento. No evento disparado, no exemplo na listagem 4.1, ele verifica o status atual do botão (linha 11), se estiver ligado/pressionado, ele chama o método “on()” do led. O `OpenDevice` detecta essa alteração e envia o comando para o hardware (firmware) e este faz o acionamento do pino correspondente ao dispositivo. Mais detalhes sobre os fluxos de execução de comandos são apresentados na seção 4.14.

O exemplo apresentado demonstra a integração entre uma aplicação e um hardware baseado em um microcontrolador, que tem um recursos extremamente limitados. Em hardwares com maior poder de processamento, denominados Mini-PCs (ex.: Raspberry), é possível executar a aplicação e fazer o controle dos dispositivos diretamente, pois ele permite acesso aos periféricos (pinos GPIO). A listagem 4.3, apresenta um exemplo resumido de como realizar o mapeamento dos dispositivos para os pinos correspondentes do RaspberryPi.

---

**Listagem 4.1** Configuração dos dispositivos - Java

---

```
1 // alguns trechos de código foram omitidos
2 public class BlinkButtonDemo extends LocalDeviceManager{
3
4     public BlinkButtonDemo() {
5
6         final Device led = new Device(1, Device.DIGITAL);
7         final Device btn = new Sensor(2, Device.DIGITAL);
8
9         connect(out.bluetooth("00:13:03:14:19:07"));
10
11         btn.onChange(device -> {
12             if(btn.isON()){
13                 led.on();
14             }else{
15                 led.off();
16             }
17         });
18     }
19 }
```

---

---

**Listagem 4.2** Configuração dos dispositivos no Arduino - Firmware/C

---

```
// alguns trechos de código foram omitidos
void setup(){
    ODev.name("ModuleName");
    ODev.addDevice(5, Device::DIGITAL); // ID:1 - led
    ODev.addSensor(3, Device::DIGITAL); // ID:2 - button
    ODev.begin(Serial1, 9600);
}

void loop(){
    ODev.loop();
}
```

---



---

**Listagem 4.3** Configuração dos dispositivos no Raspberry - Java

---

```
// alguns trechos de código foram omitidos
Device led = new Device(1, DeviceType.DIGITAL).gpio(1);
// ...
connect(new RaspberryGPIO());
```

---

## 4.4 Modelo Orientado a Eventos

O design da arquitetura segue um modelo orientado a eventos, ou *Event-Driven*, que permite desacoplar os componentes da arquitetura e aplicações. Este desacoplamento pode ser de tempo, espaço ou sincronização[125].

O mecanismo de eventos é importante na construção do framework, pois ele é considerado mais eficiente e escalável do que o modelo baseado em *Polling*, que é um mecanismo síncrono de requisição e resposta, que pode introduzir uma latência na comunicação e no tempo de resposta[126]. Esse mecanismo também permite a isolamento das aplicações, de saber qual a frequência com que os dispositivos geram os dados, passando apenas a utilizar um mecanismo de “observar” os dispositivos, e reagir aos eventos quando eles acontecem.

Os eventos gerados pelas aplicações clientes, são direcionados para o middleware ou diretamente para os dispositivos, de forma automática e transparente. Os principais eventos gerados pela arquitetura são: mudança do estado do dispositivo, associação de novos dispositivos, mudança no estado das conexões, porém existem outros e novos podem ser criados. É possível monitorar eventos gerados por dispositivos individuais, registrado ouvintes (listeners) para as instâncias específicas, ou para todos os dispositivos, registrando ouvintes (listeners) no gerenciador de dispositivos (*DeviceManager*).

Um exemplo foi apresentado na seção 4.3, listagem 4.1, onde é adicionado um “ouvinte” no dispositivo e quando o valor dele mudar, o “ouvinte” é executado. No exemplo citado, o “ouvinte” ao ser executado, faz a chamada do método “led.on()”, gerando um evento (comando) que é despachado para os componentes interessados. Um dos interessados é o *CommandDelivery*, que cuida do envio e monitoramento da entrega do comando, através das conexões de saída. Outro interessado é o serviço de armazenamento que, se habilitado, registra o histórico de alterações dos valores dos

---

dispositivos.

Algumas bibliotecas disponibilizadas para construção de aplicações clientes se baseiam no sistema Publish/Subscribe, que permite um baixo acoplamento e uma alta escalabilidade. Um dos exemplos é a biblioteca JavaScript para desenvolvimento de aplicações WEB, OPENDEVICE-JS, que utiliza o protocolo de comunicação WebSocket e consegue interagir (envio e recebimento) com os dispositivos praticamente em tempo-real.

## 4.5 API de Comandos

As informações trocadas entre hardware, middleware e aplicações clientes são baseadas em mensagens, que são chamadas de comandos e são representadas pela classe base *Command*. Esses comandos são convertidos no protocolo do OpenDevice (mais detalhes serão vistos na seção 4.15), através dos serializadores. O framework permite a comunicação com os hardwares e controle dos dispositivos, utilizando apenas os comandos, sem utilizar as abstrações obtidas com os dispositivos (classe *Device* e *Sensor*). A listagem 4.4 mostra um exemplo da equivalência da operação usando a classe *Device* e usando os comandos. A classe *DeviceCommand*, permite o envio de comandos do tipo DIGITAL e ANALÓGICO. O recebimento de informações geradas pelo hardware ou de outro componente (ex.: aplicação cliente), é realizada através de comandos. Para realizar o monitoramento e recebimento desses comandos é necessário adicionar os ouvintes (listeners) nas conexões, um exemplo simplificado é apresentado na listagem 4.5. Ao enviar um comando para o hardware, ele irá responder com uma mensagem de status, que é representada pela classe *ResponseCommand*, permitindo identificar se os comandos foram recebidos corretamente ou não. O envio das mensagens é gerenciado pelo *CommandDelivery*, que permite direcionar a mensagem para a conexão certa e monitorar a entrega. Caso ela não seja feita, devido a um delay ou falha de comunicação, ele notifica a aplicação com um erro de *timeout* detalhes desse fluxo serão apresentados na seção 4.14. A figura 4.4 mostra um diagrama de classe simplificado da API de comandos. Essa API promove mais uma camada de abstração, permitindo que, caso as implementações atuais dos dispositivos (*Device* e *Sensor*) não sejam suficientes, elas possam ser substituídas.

---

**Listagem 4.4** Comparação da API de comandos e Devices

---

```
// Usando a API de comandos
DeviceConnection conn = Connections.out.usb();
conn.send(DeviceCommand.ON(1)); // '1' is DeviceID

// Usando a abstração
Device led = new Device(1, Device.DIGITAL);
led.on();
```

---

---

**Listagem 4.5** Monitorando recebimento de comandos

---

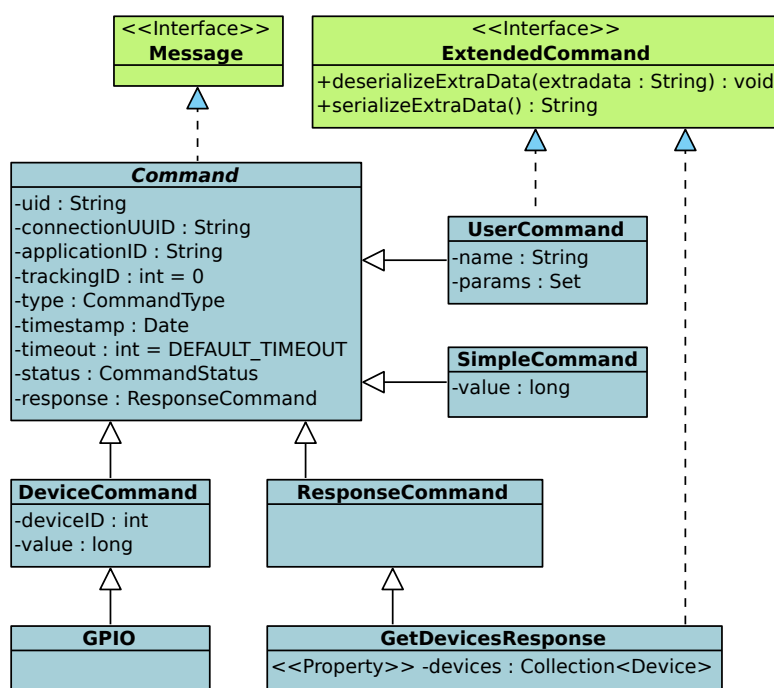
```
DeviceConnection conn = Connections.out.usb();
conn.addListener(new ConnectionListener() {
    public void onMessageReceived(Message message,
        DeviceConnection connection) {
        String type = message.getClass().getSimpleName();
        System.out.println("onMessageReceived("+type+"): "+
            message);
    }
});
```

---

## 4.6 Mecanismo de extensão

Como mencionado na seção 4.1.4, o mecanismo de extensão da arquitetura é baseado no SPI (Service Provider Interface), um recurso simples e leve, disponível no Java 6 e posteriores. Embora a arquitetura tenha sido projetada como um framework, para ser usado como base para criação de projetos mais especializados, existe uma implementação padrão, denominada *middleware*, que permite customizações através de extensões/plug-ins. Os mecanismos de extensão padrão estão voltados para: (1) conexões, permitindo adicionar novas conexões ou substituir por implementações mais eficientes, (2) tratadores de eventos, que permitem plugar estratégias de tratamento de eventos, e (3) sistema de armazenamento. As extensões são implementadas através da interface *OpenDeviceExtension*, que são inicializadas durante o carregamento da aplicação. Para que as

---

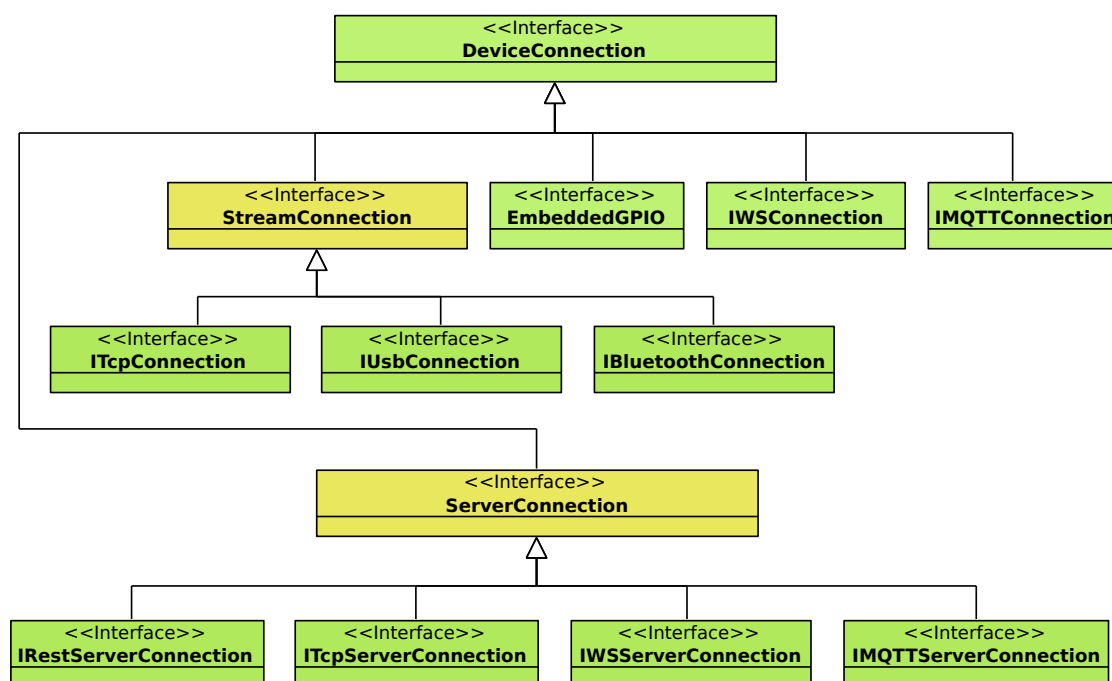


**Figura 4.4** Diagrama de classe simplificado dos Comandos

extensões sejam carregadas corretamente é necessário que no módulo (.jar), seja incluído o arquivo de configuração na pasta: *resources/META-INF/services*, com o nome: *br.com.criativasoft.opendevice.engine.js.ExtensionPoint*, seguindo as especificações do SPI. As conexões seguem um mecanismo similar, porém possuem seus pontos de extensão individualizados para cada tipo de conexão, como foi visto na figura 4.5.

### 4.6.1 Framework de Conexões

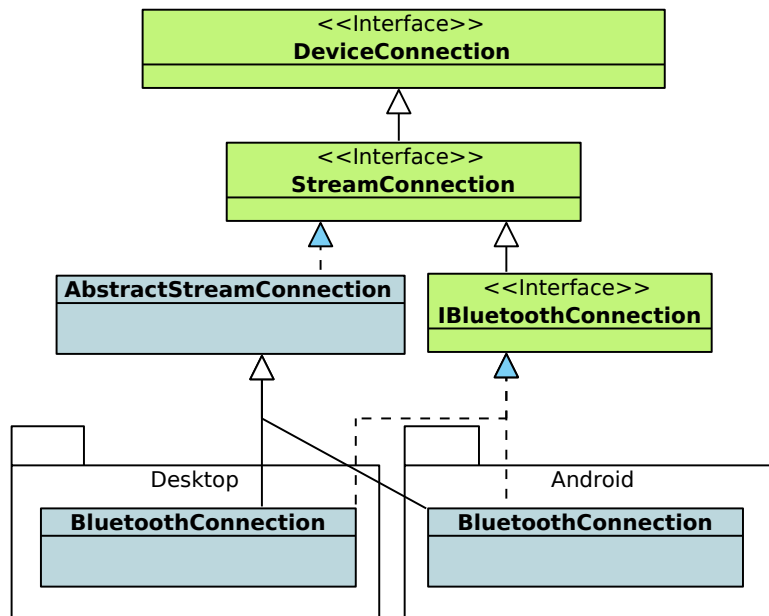
O framework de conexões foi projetado para ser usado de forma independente do restante da arquitetura. A figura 4.5 mostra a hierarquia base das conexões suportadas pela arquitetura. Essas interfaces são os pontos de extensão, permitindo que implementações possam ser utilizadas de acordo com a plataforma ou mesmo trocadas por uma implementação mais eficiente. A figura 4.6 mostra um exemplo de implementação da conexão Bluetooth. A implementação para aplicações Desktop é fornecida pelo módulo CONNECTION-STREAM, já a implementação para aplicações Android são fornecidas pelo módulo ANDROID-STREAM, dessa maneira é possível que uma aplicação possa ser portada sem modificações no seu código base para outras plataformas. No OpenDevice a implementação correta é escolhida pela fábrica de conexões, usando



**Figura 4.5** Diagrama de classe das conexões

*Connections.out.bluetooth*("..."). Esta fábrica está disponível no módulo core, e possui método para criação das principais tecnologias de comunicação suportadas, tanto clientes, como servidores. Os principais componentes desse framework e suas descrições são listadas a seguir.

- **DeviceConnection** - Interface base para todas as conexões do sistema, define o modo de operação geral das conexões e em conjunto com o *MessageSerializer* define o modelo de protocolo a ser utilizado. Possui uma implementação base, através da classe *AbstractConnection*, que facilita a criação de implementações finais.
- **MessageSerializer** - Como mencionado anteriormente, é o componente responsável pela serialização e desserialização das mensagens enviadas e recebidas pelas conexões. São as implementações que definem o tamanho e formato das mensagens. A implementação padrão, localizada no módulo core, é feita pela classe *CommandStreamSerializer*.
- **ConnectionListener** - Interface que permite monitorar de forma plugável os eventos ocorridos na conexão, como conexão, desconexão e recebimento de mensagens,



**Figura 4.6** Exemplo de implementação da conexão bluetooth

permitindo às aplicações reagirem à esses eventos. Vários ouvintes de eventos (Listeners) podem ser adicionados à conexão.

- Message - Interface que encapsula os dados enviados e recebidos, exemplos de implementações são *ByteMessage*, *Request*, etc. A implementação base usada no OpenDevice é realizada pela classe *Command*, localizada no módulo core.

No OpenDevice, esse framework é utilizado em duas camadas: (1) conexões de entrada (Input), que são os servidores e têm por objetivo disponibilizar os serviços para as aplicações clientes, como por exemplo o servidor REST, e (2) conexões de saída (Output), denominados na maioria das vezes como streams, que são as conexões com os módulos físicos (hardware) e que implementam o protocolo de baixo nível, realizando a serialização e desserialização dos comandos enviadas pelas aplicações.

## 4.7 Módulos Servidores

Os módulos servidores, são responsáveis por fazer a interface com as aplicações clientes. Eles permitem a inclusão de novos mecanismos de conexão ou novos protocolos. Um exemplo de utilização de novo protocolo é encontrado no servidor REST, que expande o

protocolo do OpenDevice (4.15), permitindo criar interfaces mais simples e de mais alto nível para as aplicações cliente se comunicarem com os dispositivos.

O servidor WebSocket permite que aplicações (Web, Desktop, Mobile) se comuniquem em tempo real e de forma bidirecional com os dispositivos, usando middleware. O framework é projetado seguindo dois conceitos de conexões: (1) conexões de entrada (Input), que são os servidores, e (2) conexões de saída (Output), que são as conexões com os dispositivos físicos. O papel do middleware é realizar a tradução dos protocolos de entrada e converte-los para os protocolos de saída, específicos para cada dispositivo, conforme a figura 4.7. O módulo de visualização (com gráficos e dashboards), apresentado na seção 4.9, utiliza as conexões em WebSocket para permitir a comunicação em tempo-real com os dispositivos.

Os servidores permitem a abstração e desacoplamentos entre dispositivos e aplicações, de modo que uma aplicação pode se comunicar com vários dispositivos, ou permitir que várias aplicações se comuniquem com o mesmo dispositivo, contornando alguns problemas das conexões que suportam apenas um cliente, como no caso do Bluetooth e USB.

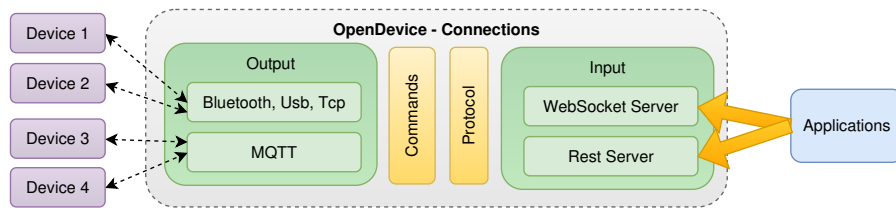
Os servidores foram projetados pensando na otimização de recursos do hardware. Como o objetivo é permitir que eles possam executar em hardwares, na categoria Mini-PCs, como o Raspberry e BeagleBone, as implementações dos servidores utilizados no middleware, foram escolhidas de modo que rodassem de forma embarcada e compartilhado o máximo de recursos possíveis. Devido a arquitetura estar projetada para suportar inicialmente os protocolos HTTP, Rest, WebSocket e MQTT, as implementações dos mesmos seriam um desafio, devido a variedade de requisitos, estaria fora do escopo da proposta deste trabalho. Foi então realizado um estudo que mapeou as implementações desses protocolos individualmente, e observou-se que as soluções mais maduras estavam baseadas em frameworks de rede. Os principais frameworks encontrados foram: Jetty (Eclipse)<sup>2</sup>, Grizzly (GlassFish)<sup>3</sup> e Netty<sup>4</sup>. O Jetty é um contêiner de aplicações Java e servidor web, que tem uma estrutura modular e suporta protocolos como Http e WebSocket. Apesar de ser possível executar de forma embarcada, sua estrutura foi planejada para executar aplicações Java web (.war), não como um framework genérico e nem com plataformas embarcadas em mente. O Grizzly por sua vez é projetado como um

---

<sup>2</sup><http://www.eclipse.org/jetty/>

<sup>3</sup><https://grizzly.java.net>

<sup>4</sup><http://netty.io>



**Figura 4.7** Fluxo de conexão e descoberta

framework, e utilizado como base na construção do servidor de aplicação GlassFish, suportando também HTTP, WebSocket e sendo de fácil extensão. Por fim, o Netty, é também um framework que tem uma estrutura simples, é utilizado para construção de projetos como Apache Spark, Elasticsearch, Neo4j (banco de dados), Minecraft e outros<sup>5</sup>. O Netty é framework utilizado como base das implementações dos servidores escolhidos para o projeto arquitetura.

A escalabilidade da arquitetura pode ser alcançada, substituindo os implementações dos servidores embarcados, por implementações mais robustas, que permitam escalonamento horizontal e balanceamento de carga. Isto pode ser alcançado, de forma transparente para a aplicação, utilizando os mecanismos de extensão (4.1.4, 4.6).

### 4.7.1 Servidor MQTT

A implementação de servidor MQTT escolhida, foi o “Moquette MQTT”, projeto mantido pela fundação Eclipse, e que utiliza como base o framework de rede Netty.

Os servidores são em sua maioria destinados à comunicação com as aplicações clientes (conexões de entrada). O MQTT é uma exceção, pois permite que os dispositivos físicos também sejam conectados ao middleware. Para permitir um gerenciamento e integração com o middleware, e permitir a comunicação bidirecional entre aplicações e dispositivos físicos, algumas convenções foram adotadas na nomenclaturas dos tópicos.

Tanto as aplicações como os dispositivos físicos são “publish” e “subscriber”. O middleware é o encarregado de monitorar as mensagens e fazer o direcionamento adequado, atuando como espécie de “subscriber” geral. Caso uma aplicação envie uma requisição para um dispositivo, é papel do middleware fazer o direcionamento para o tópico correto, e monitorar a resposta e envia-la de volta (publish) para a aplicação que

<sup>5</sup><http://netty.io/wiki/adopters.html>



fez a requisição. A camada das aplicações não conhecem a estrutura de tópicos do borker MQTT e seu mapeamento para os dispositivos, elas apenas possuem as abstrações dos dispositivos, orientadas a objetos, e enviam os comandos para o middleware (ex.: `device.on()`). Isso permite que aplicações clientes MQTT consigam se comunicar com dispositivos Bluetooth e MQTT de forma transparente.

A tabela 4.1, apresenta as nomenclaturas estabelecidas para o nome dos tópicos. Quando uma aplicação realiza uma operação na abstração do dispositivo (ex.: `device.on()`), um comando é enviado para tópico “ProjectID/middleware/in”, que é o canal que o middleware usa para o recebimento dos comandos das aplicações. Na implementação atual, por ser embarcada, o recebimento é feito diretamente sem necessidade do middleware se inscrever nos tópicos. O middleware identifica o dispositivo e determina qual conexão que o dispositivo em questão está vinculado, que pode ser uma conexão Bluetooth ou MQTT, nesse último caso, o firmware envia (publish) o comando para seu respectivo tópico: “ProjectID/in/ModuleName”.

O componente denominado “Firmware” é um hardware (ex.: arduino) que pode estar gerenciando um ou mais dispositivos (sensores e atuadores), onde internamente cada um recebe uma identificação (DeviceID). Cada conexão com um hardware recebe uma identificação chamada “ModuleName”.

| Componente | Operação   | Tópico                       | Descrição                  |
|------------|------------|------------------------------|----------------------------|
| Firmware   | Publish    | ProjectID/out                | Envio de Dados             |
| Firmware   | Subscribe  | ProjectID/in/ModuleName      | Recebimento de comandos    |
| Middleware | Subscribe* | ProjectID/out                | * Monitoramento (Listener) |
| Middleware | Subscribe* | ProjectID/middleware/in      | * Monitoramento (Listener) |
| App        | Publish    | ProjectID/middleware/in      | Envio de Comandos          |
| App        | Subscribe  | ProjectID/middleware/out     | Notificações Gerais        |
| App        | Subscribe  | ProjectID/middleware/out/CID | Tópico de Resposta         |

**Tabela 4.1** Nomenclatura de tópicos MQTT

### 4.7.2 Servidores WebSocket, Rest e Http

O WebSocket é o protocolo originalmente utilizado para permitir a comunicação em tempo-real com as aplicações Web, porém é possível a sua utilização em aplicações Desktop. A implementação desse protocolo é fornecida pelo projeto Nettosphere<sup>6</sup>, também

<sup>6</sup><https://github.com/Atmosphere/nettosphere>

baseado no framework Netty. O grande diferencial é que ele oferece a implementação dos três protocolos utilizando a mesma porta (ex.: 80), e consequentemente poupando muitos recursos do hardware. Isso é possível devido a estrutura de processamento do framework Netty, que permite identificar e processar cada protocolo separadamente. Teoricamente o mesmo poderia ser feito para o protocolo MQTT, mas seria um desafio atingir o nível de maturidade da implementação embarcada que adotamos.

O servidor HTTP, permite a configuração de pastas de recursos como HTML, CSS e imagens, permitindo a criação de interfaces gráficas.

O servidor REST, permite a criação de serviços que atendem ao protocolo REST. A integração com o Jersey<sup>7</sup>, permite a implementação da especificação Java (*JAX-RS - The Java API for RESTful Web Services*), facilitando e padronizando a criação de novos serviços, estendendo as capacidades do *middleware*. Os serviços Rest criados, contam com suporte a injeção de dependências, seguindo a especificação JSR-330, que se utilizam das anotações *@Inject* e *@Named*, para injeção dos componentes.

## 4.8 Suporte a JavaScript

O suporte a JavaScript permite a criação de aplicações simples e tratadores de eventos, que rodam nativamente, e é integrado ao OpenDevice através do mecanismo de extensões. Também é possível criar aplicações Web, utilizando JavaScript, com auxílio da biblioteca OPENDEVICE-JS, que permite a abstração dos dispositivos e implementa os protocolos REST e WebSocket.

No primeiro caso, é possível criar aplicações que executa nativamente, ou seja, sem depender de um navegador, pois rodam diretamente na JVM, Este suporte é fornecido através do módulo JS-ENGINE, que usa os recursos da própria JVM implementados no projeto Nashorn<sup>8</sup>. Este recurso auxilia na sua utilização por desenvolvedores que não têm experiência com linguagem Java ou mesmo desenvolvedores experientes que precisam realizar uma prototipação mais rápida ou pela simplicidade da implementação de tratamento de eventos com uma linguagem de script. Devido a necessidade de recursos avançados da JVM, esse módulo (JS-ENGINE) depende da versão Java 8, que inclui várias melhorias de performance e integração com JavaScript. Os modos de desenvolvimento

---

<sup>7</sup><https://jersey.java.net>

<sup>8</sup><http://openjdk.java.net/projects/nashorn/>

serão detalhados a seguir.

### 4.8.1 Criação de aplicações nativas em JavaScript

As aplicações criadas em JavaScript, executam na JVM e têm interoperabilidade com as classes definidas em Java. Desse modo é possível realizar chamadas nas classes e métodos do OpenDevice. A listagem 4.6, demonstra um exemplo de criação de uma aplicação simples, que ao detectar uma mudança no botão (BUTTON), controla o estado da lâmpada (led). O módulo JS-ENGINE pode ser compilado para um executável (odevjs.exe ou odevjs.jar), destinado a execução de aplicações em JavaScript usando o comando:

```
> odevjs.exe myscript.js.
```

Outro exemplo de aplicação, usando interface gráfica (GUI) em JavaFX, pode ser encontrado no Apêndice 6.2. Para habilitar o JavaFX é necessário informar o parâmetro “-fx”, exemplo: > odevjs.exe -fx myscript.js. Os códigos JS podem ser executados diretamente de aplicações Java, através da classe *OpenDeviceJSEngine*, exemplo:

```
OpenDeviceJSEngine.run("myscript.js").
```

---

**Listagem 4.6** Exemplo de Aplicação em JavaScript

---

```
var led = new Device(1, DIGITAL);
var button = new Sensor(2, DIGITAL);

button.onChange(function() {
    if(button.isON()) {
        led.on();
    }else{
        led.off();
    }
});

connect(usb());
```

---

### 4.8.2 Tratadores de Eventos (EventHook)

Os tratadores de evento (EventHook), são pequenos trechos de código JavaScript que estão vinculados os dispositivos (Devices e Sensors) e são executados quando acontece alguma mudança do seu valor. Esse mecanismo é uma extensão para o EventManager, e implementada pela classe *JavaScriptEventHandler*. A implementação padrão faz o carregamento dos scripts através de arquivos, mas pode-se implementar outras formas de armazenamento/carregamento. Na implementação atual os eventos são mapeados para os dispositivos através de metadados incluídos no próprio script. Na listagem 4.7, é implementado a mesma lógica da listagem 4.6, entretanto, eles não são interpretados através do executável (odevjs.exe), eles são gerenciados pelo middleware e são executados quando os dispositivos mapeados através da anotação @DEVICES, sofrem alguma modificação. A variável “device”, é injetada pelo framework e representa o dispositivo que sofreu a alteração.

---

**Listagem 4.7** Exemplo do “EventHook” em JavaScript

---

```
/**
 * @name ButtonHookDemo
 * @devices 2
 * @description TestCase
 * @type JavaScript
 */
var led = findDevice(1);
if(device.isON()){
    led.on();
}else{
    led.off();
}
```

---

### 4.8.3 Criação de aplicações WEB em JavaScript

A biblioteca OPENDEVICE-JS foi desenvolvida para auxiliar no desenvolvimento de aplicações Web escritas em qualquer outra linguagem, e sua integração com os dispositivos físicos. Ela permite a comunicação em tempo real com os dispositivos graças ao suporte a WebSocket. Trabalha no modelo orientado a eventos, ou seja, quando ocorre

---

alguma mudança no estado no dispositivo, o evento “*onChange*” é chamado, conforme no exemplo na listagem 4.8. Ela é utilizada na construção do *Front-End Web* do middleware (4.9), que permite fazer o controle dos dispositivos, realizar a análise e visualização de dados em tempo-real ou de dados históricos.

---

**Listagem 4.8** Exemplo de utilização da biblioteca OPENDEVICE-JS

---

```
<script>
  $(function(){ // JQuery ready()
    ODev.connect();

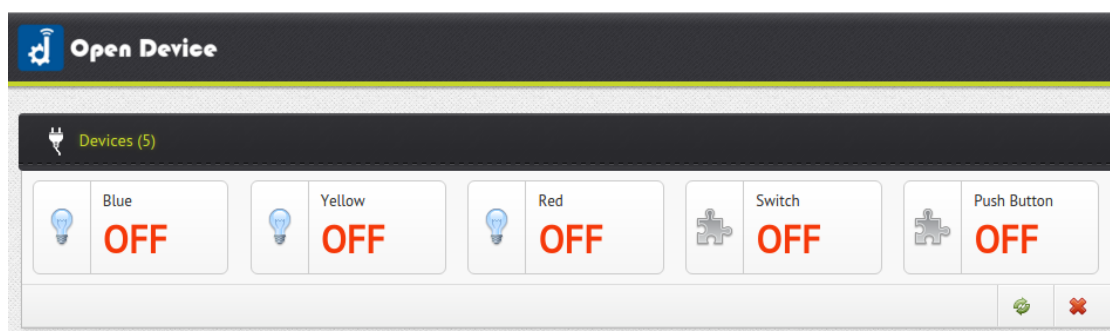
  });

  ODev.onChange(function(device){
    if(device.sensor){
      ODev.findDevice(1).setValue(device.value);
    }
  });
</script>
```

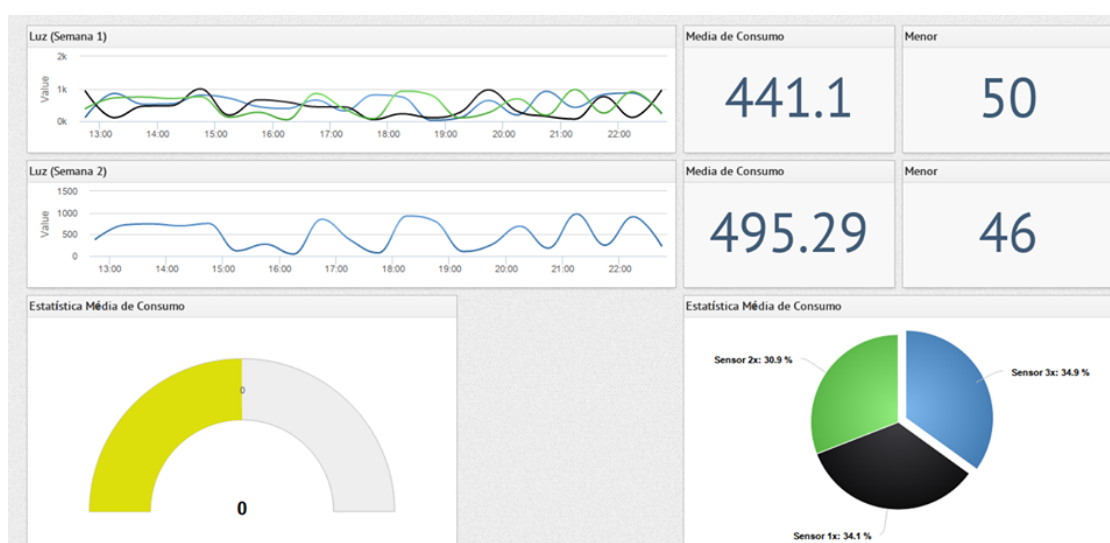
---

## 4.9 Visualização e controle dos dispositivos

O middleware conta uma interface Web (figura 4.8 e 4.9), desenvolvida em HTML5 e AngularJS, e é implementado pelo módulo OPENDEVICE-WEB-VIEW, que permite o monitoramento, controle dos dispositivos e visualização dos dados através de gráficos e indicadores. A visualização pode ser em tempo-real ou através de consultas a dados históricos. É possível aplicar funções como: (1) média, (2) mínimo, 3 (máximo), 4 (soma), 5 (contagem) e 6 (desvio padrão), nos dados de um determinado intervalo que é configurado via a interface gráfica. Os gráficos implementados são: (1) gráfico de linha, (2) gráfico de pizza, (3) gauge e (4) indicador numérico. Os *dashboards* são altamente flexíveis, permitindo configurar o tamanho, adicionar e remover gráficos. Alguns gráficos permitem a inclusão de vários dispositivos, permitindo uma análise comparativa, como no exemplo da figura 4.9 (Luz Semana 1), foram incluídos três dispositivos em um gráfico de linha. O mesmo permite funções de zoom em determinado período de forma interativa. Os dashboards permitem também a inclusão de dispositivos e sensores digitais, permitindo o controle, ativação, desativação e visualização do status atual.



**Figura 4.8** Interface de controle de dispositivos



**Figura 4.9** Interface de Dashboards Gráficos

## 4.10 Serviço de descoberta

Conectar e configurar um dispositivo (microcontrolador, sensor ou atuador), é uma tarefa relativamente simples. Fazer o mesmo para centenas ou milhares de dispositivos, não é uma tarefa fácil. Este é o cenário que os pesquisadores e desenvolvedores irão encontrar no ambiente de Internet das Coisas. Um mecanismo dinâmico, adaptável e utilizando um processo mais automatizado possível, é necessário para realizar a descoberta de dispositivos e registro de suas informações básicas. Além disso existe a necessidade de trabalhar de forma unificada com diferentes protocolos e dispositivos de rede.

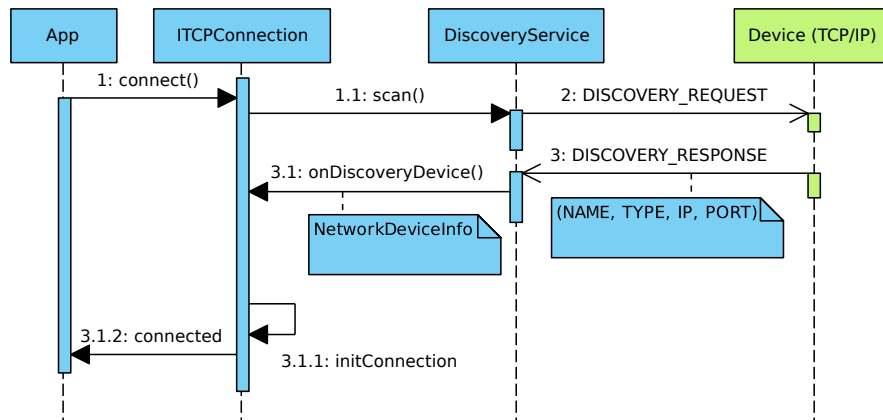
O framework conta com serviços de descoberta de dispositivos, suportando as tecno-

logias Usb, Bluetooth, Ethernet e Wi-Fi. O middleware também disponibiliza um serviço de descoberta, permitindo que as aplicações clientes o localizem em uma rede local. São dois os possíveis cenários onde as aplicações e dispositivos IoT estarão executando: Local e Internet. No cenário onde os dispositivos estão conectados à Internet, eles devem ser configurados para atuarem como clientes, conectando-se no servidor em nuvem do OpenDevice em um endereço fixo. Já em um cenário local, focando-se em dispositivos Ethernet, no cenário de automação residencial, por exemplo, os dispositivos poderiam atuar em modo cliente ou como servidor, em ambos os cenários seria necessário configurar manualmente um IP fixo para cada dispositivo, uma tarefa relativamente trabalhosa dependendo da quantidade de dispositivos.

Uma solução promissora é o padrão DNS-SD (DNS Service Discovery, RFC 6763) [127], que permite a descoberta de serviços na rede e associação de um “DNS local” para o dispositivo, como por exemplo: *lampada1.local*. Devido às limitações de alguns hardwares alvos do estudo (microcontroladores), uma solução mais simples foi adotada. Trata-se do envio de mensagens UDP em broadcast na rede. Os dispositivos (hardware) monitoram a rede e ao detectar uma solicitação de descoberta (um comando do tipo *DISCOVERY\_REQUEST*), enviam uma mensagem de volta contendo o seu nome, tipo, IP atual, e porta. Desse modo, todos os dispositivos podem ser configurados com IP dinâmico usando DHCP, incluindo o próprio servidor (middleware). As aplicações clientes podem localizar os dispositivos ou middleware utilizando o mesmo mecanismo.

Foi desenvolvida uma estratégia bastante simples, influenciada pelo DNS-SD e combinado com a técnica desenvolvida, para conexão com os dispositivos TCP/IP, usando um endereço com sufixo pré-definido (ex.: *lampada1.local.opendevice*). A listagem 4.9 apresenta um modelo tradicional de descoberta e o modelo usando os endereços de domínio local. No primeiro exemplo (modelo tradicional) é obtido o serviço de descoberta e iniciado a busca durante 5 segundos por dispositivos na rede, em seguida é feita a conexão. No segundo exemplo, ele permite a simplificação do processo. O endereço informado “*lampada1.local.opendevice*”, na verdade não se trata de um domínio, serve apenas para marcar e iniciar o sistema de descoberta automático, permitindo uma fácil conexão com determinado dispositivo (hardware). A imagem 4.10 apresenta um diagrama de fluxo de como esse processo funciona.

As conexões USB e Bluetooth, possuem mecanismos de descobertas menos sofisticados, oferecidos pelas próprias implementações no S.O, que são usados pelo serviço de descoberta. No caso do USB, a classe que implementa essa conexão (*UsbConnection*),



**Figura 4.10** Fluxo de conexão e descoberta

possui o método “listAvailable”, que lista todos os dispositivos USB-Serial conectados na maquina. É possível realizar facilmente uma conexão com o primeiro dispositivo encontrado usando: `connect(out.usb())`. A implementação para Bluetooth é similar, onde o método “listAvailable” da classe (*BluetoothConnection*), realiza a listagem dos dispositivos seriais SSP - (Serial Port Profile) disponíveis, também é possível conectar-se facilmente com o primeiro dispositivo encontrado, usando: `connect(out.bluetooth())` (observe que, antes é necessário realizar manualmente o pareamento dos dispositivos).

#### Listagem 4.9 Exemplos de descoberta de dispositivos

```
// Modelo tradicional
Set<NetworkDeviceInfo> devices =
    getDiscoveryService().scan(5000, null);
if(devices.size() > 0){
    NetworkDeviceInfo info = devices.iterator().next();
    if(info.getName().equals("lampada1")) {
        connect(out.tcp(info.getIp() + ":" + info.getPort()));
    }
}

// Modelo usando domínio local
connect(out.tcp("lampada1.local.opendevicelocal"));
```



## 4.11 APIs para Aplicações Cliente

O conjunto de bibliotecas ou APIs para aplicações clientes, permitem a rápida construção de aplicações, sem que os pesquisadores ou desenvolvedores tenham que se preocupar com os detalhes de baixo nível do protocolo, adotando um modelo orientado a eventos (*Event-Driven*) e usando orientação a objetos na construção das aplicações, que podem ser aplicações Web, Desktop, Mobile ou uma interface simulação. O maior desafio encontrado na construção dessas aplicações é lidar com a heterogeneidade dos dispositivos (atuadores e sensores), fazer o gerenciamento das conexões e a integração com a aplicação. A arquitetura disponibiliza um middleware e um framework para construção aplicações ou middleware customizadas.

As bibliotecas disponibilizadas permitem uma comunicação bidirecional e são focadas na comunicação em tempo real, dessa maneira é possível construir gráficos para visualização das informações em tempo-real, aplicações de simulação, etc. As tecnologias empregadas que permitem essa comunicação, estão disponíveis para as plataformas Web, Desktop e Mobile, conforme a tabela 4.2.

| Tipo         | Web | Desktop | Mobile (Android) | Alvo de Comunicação |
|--------------|-----|---------|------------------|---------------------|
| USB          |     | X       |                  | Firmware            |
| Bluetooth    |     | X       | X                | Firmware            |
| Socket (TCP) |     | X       |                  | Middleware/Firmware |
| WebSocket    | X   | X       | X                | Middleware          |
| MQTT         |     | X       | X                | Middleware          |

**Tabela 4.2** APIs Clientes

### 4.11.1 Implementação

A maior parte das bibliotecas são implementados em linguagem Java com base no framework de conexões (4.6.1) e utilizam o módulo principal (core), que provê as APIs de comandos e abstração de dispositivos. Porém são disponibilizadas bibliotecas em JavaScript, apresentada na seção 4.8, e Python (experimental). As tecnologias de comunicação (ex.: USB), são implementadas com auxílio de bibliotecas externas, e suas considerações são listadas a seguir.

## USB

A comunicação USB, por utilizar recursos do sistema operacional e ser dependente da arquitetura, não possui suporte nativo na JVM, apesar de ser uma das especificações iniciais da plataforma, registrada sobre a especificação Java USB API (JSR-80)[128].

Como alternativa, algumas bibliotecas de terceiros foram avaliadas. Uma das pioneiras e mais utilizadas é a biblioteca RXTX<sup>9</sup>. Esta biblioteca foi utilizada nas versões iniciais da plataforma, porém, pelo fato de não ter um desenvolvimento ativo, e nos testes realizados ter se mostrado instável, apresentando alguns erros (ex.: problemas de deadlocks e mal funcionamento em plataformas ARM), ela foi substituída.. A implementação de referência oficial, javax-usb<sup>10</sup>, a julgar pelo site e documentação, estão abandonados há muito tempo.

A implementação utilizada, foi baseada na biblioteca JSSC (Java Simple Serial Connector)<sup>11</sup>, que oferece suporte para várias plataformas<sup>12</sup>, se mostrando uma alternativa promissora. Ela é a biblioteca utilizada na IDE do Arduino, substituindo a RXTX em versões anteriores.

## Bluetooth

A comunicação Bluetooth é apoiada na especificação Java JSR-82[129], possui implementações bem estabelecidas e estáveis para o desenvolvimento para dispositivos móveis, usando JavaME. As implementações para ambiente desktop, sofrem com os mesmos problemas de plataforma do USB. Uma das poucas alternativas, é a biblioteca BlueCove<sup>13</sup>, que tem implementações para os principais sistemas operacionais (Windows, Linux, MacOS). Para o suporte à plataformas ARM (no RaspberryPi), foi necessário a recompilação da mesma e ajustes, pois não foram encontradas versões disponibilizadas no site oficial nem de terceiros.

As implementações para aplicações mobile, estão disponíveis para o Android, e utiliza as APIs disponibilizadas pela própria plataforma. A arquitetura do OpenDevice, é

---

<sup>9</sup><https://github.com/rxtx/rxtx>

<sup>10</sup><http://javax-usb.sourceforge.net/>

<sup>11</sup><https://github.com/scream3r/java-simple-serial-connector>

<sup>12</sup>Segundo o site: Windows(x86, x86-64), Linux(x86, x86-64, ARM soft & hard float), Solaris(x86, x86-64), Mac OS X(x86, x86-64, PPC, PPC64)

<sup>13</sup><http://bluecove.org/>

projetada de maneira que a implementação utilizada é transparente para o desenvolvedor, sem precisar de modificações no código.

### **Socket (TCP)**

Foi implementada usando as APIs nativas do Java, usando as classes da API de Socket. Devido o Java ser projetado para construção de sistemas em rede, as APIs de comunicação são suportadas em praticamente todas as plataformas.

Apesar de ser compatível com as plataformas mobile (Android), a implementação atual não é indicada, por não levar em consideração requisitos de consumo de bateria.

### **WebSocket**

A implementação de WebSocket para plataforma Web utiliza as próprias APIs disponibilizadas pelos navegadores, através da implementação da especificação de WebSocket para o HTML5[130, 131].

A implementação para aplicações Desktop e Mobile(Android), são baseadas na biblioteca wAsync<sup>14</sup>. As especificações da API de WebSocket para plataforma Java, estão disponíveis através da especificação JSR 356[132], e uma implementação de referência chamada Tyrus<sup>15</sup>, se mostra promissora, porém ainda conta com limitações para utilização no Android e por conta disso não foi utilizada.

## **4.12 Armazenamento**

O sistema de armazenamento guarda informações sobre as conexões, dispositivos e histórico de dados. A implementação padrão é baseada em um banco de dados orientado a grafos, chamado Neo4j<sup>16</sup>, baseado no conceito NoSQL, que permite ser executado de forma embarcada, junto com a aplicação. A base da arquitetura do Neo4j é construída usando o framework Netty, o mesmo utilizado nas implementações dos módulos de servidores (4.7), permitindo otimizando alguns recursos de espaço e consumo de memória.

---

<sup>14</sup><https://github.com/Atmosphere/wasync>

<sup>15</sup><https://tyrus.java.net/>

<sup>16</sup><http://www.neo4j.com>

Ao incluir o middleware e o módulo de interface gráfica, as informações sobre os *dashboards* e configuração dos gráficos também são armazenadas. Na construção de aplicações e protótipos, o sistema de armazenamento pode ser dispensado, usando apenas o sistema de cache de dispositivos, porém este não permite a visualização de dados históricos.

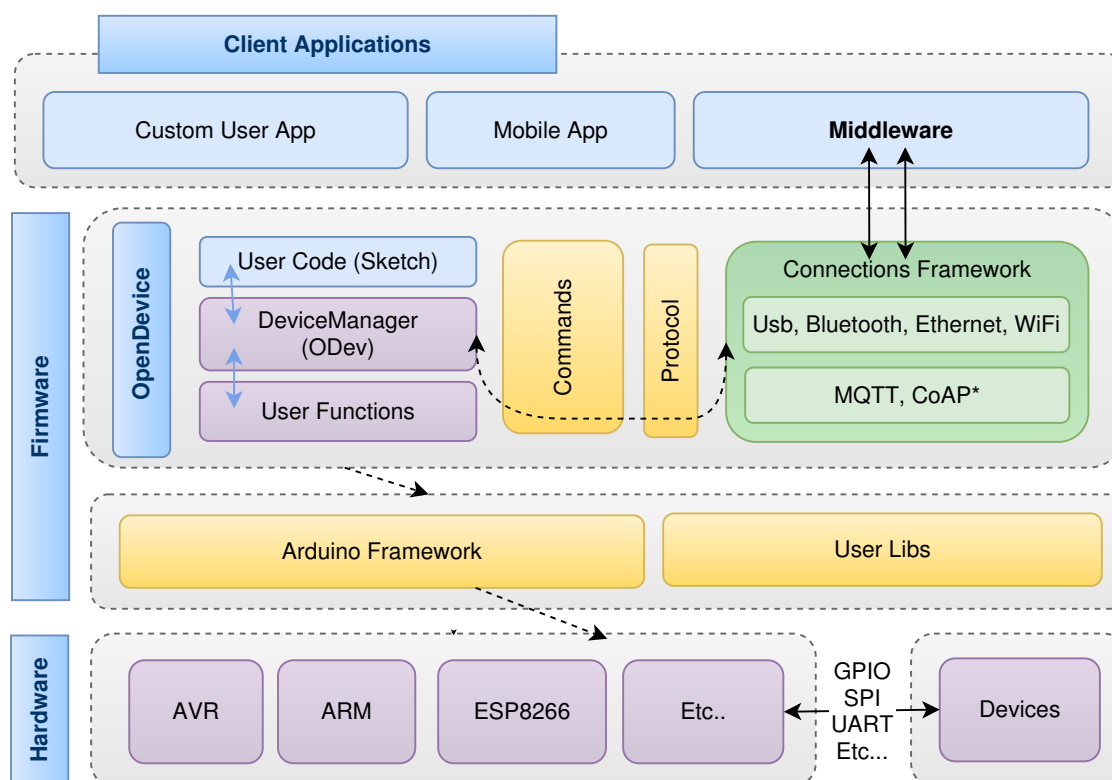
## 4.13 Firmware

O firmware é um componente que permite a criação de dispositivos (coisas) para Internet das Coisas. Ele foi projetado para criação de sistemas embarcados para microcontroladores, e se baseia na API do Arduino para acesso aos periféricos do microcontrolador. Apesar de utilizar a API do Arduino, ele não está limitado apenas aos *hardwares* denominados Arduino. Várias outras plataformas vem implementando o suporte a sua API[11, 13], como por exemplo o ESP8266[10], um SoC (System-On-Chip) de 32 bits com Wi-Fi embutido. Hardwares com maior poder de processamento e que suportem a execução na JVM (Máquina Virtual Java), não farão utilização do firmware.

O firmware é flexível e pode ser utilizado como base para criação sistemas embarcados customizados, dando suporte a várias tecnologias de comunicação, como: Usb, Bluetooth, Ethernet e Wi-Fi, que pode operar tanto no modo cliente como no modo servidor (vide tabela 4.3). Dentro da plataforma do Arduino ele é disponibilizado como uma biblioteca escrita em C++, e é responsável pelo gerenciamento dos dispositivos, conexões e implementa o protocolo do OpenDevice.

### 4.13.1 Visão Geral

Na figura 4.11 é apresentada uma visão geral de como a arquitetura do *firmware* está estruturada. Podemos observar que ela é similar a arquitetura geral do projeto (Figura 4.2), a camada central, que compreende o firmware, é a junção das bibliotecas do Arduino, APIs do OpenDevice e o código do usuário (*User Code*), que auxiliam na criação dos sistemas embarcados. A camada superior, compreende as aplicações cliente, que implementam os protocolos de baixo nível (4.15), com auxílio das bibliotecas disponibilizadas pelo OpenDevice.

**Figura 4.11** Arquitetura do Firmware

### 4.13.2 Meios de comunicação suportados

A tabela 4.3 apresenta as tecnologias de comunicação que são suportadas, destacadas juntos com os modelos de comunicação. Entende-se por modelo de comunicação a forma como o firmware irá operar, se é no modo cliente ou no modo servidor.

| Tipo      | Cliente | Servidor |
|-----------|---------|----------|
| Usb       | Não     | Sim      |
| Bluetooth | Não     | Sim      |
| Ethernet  | Sim     | Sim      |
| Wi-Fi     | Sim     | Sim      |

**Tabela 4.3** Comunicação suportada pelo firmware

### 4.13.3 Gerenciamento de conexões

O bloco denominado “Connections Framework”, trata-se de adaptações das bibliotecas disponibilizadas pelo Arduino (“User Libs” e nativas) para implementação das conexões,

usando seus respectivos módulos (shields), permitindo assim a comunicação com o middleware e aplicações. Por exemplo, o suporte a conexões Ethernet usando o módulo ENC28J60, necessita de uma biblioteca específica que realiza a implementação do protocolo TCP/IP via software, já o módulo(shield) Ethernet baseado no chip W5100 é suportado nativamente pelo framework do Arduino e OpenDevice. O Arduino disponibiliza uma API base para implementação das conexões Ethernet e Wi-Fi. Módulos (shields) que implementem essa API estariam compatíveis automaticamente com o OpenDevice.

As conexões USB e Bluetooth, são comunicações seriais, acessíveis através de portas UART, referenciadas geralmente pelas variáveis *Serial*, *Serial1*, etc. E que têm como implementação base a classe *Stream*(do Arduino). Outras tecnologias de conexão, que se baseiem nos mecanismos apresentados acima serão automaticamente suportados, ou necessitariam de pequenos ajustes.

As tecnologias implementadas estão listadas na tabela 4.3 e mais adiante na seção de hardwares testados (5.1);

#### 4.13.4 Gerenciamento dos dispositivos

No firmware é realizado o mapeamento dos dispositivos e seus respectivos IDs para os pinos do microcontrolador. Ele interpreta os comandos enviados pelas aplicações e as transforma em ações. Um exemplo de mapeamento dos dispositivos é demonstrado da listagem 4.10, onde é feita a configuração de forma estática, adicionando atuadores e sensores. As classes que abstraem os dispositivos existem, e são baseados na classe *Device*, e conta com um atributo do tipo *booleano* chamado "sensor", para identificar se é um atuador ou sensor.

---

**Listagem 4.10** Exemplo de configuração do firmware

---

```
#include <OpenDevice.h>
// Mapeamento dos Dispositivos
void setup() {
    ODev.name("ODev-Thing1");
    ODev.addCommand("alertMode", alertMode);
    ODev.addDevice(5, Device::DIGITAL); // ID:1
    ODev.addSensor(3, Device::DIGITAL); // ID:2
    ODev.addSensor(RFIDSensor(10,9)); // ID:1
    ODev.begin();
}

void loop() {
    ODev.loop();
}
// Comando de Usuario
void alertMode() {
    ODev.debug(ODev.readString());
    int count = ODev.readInt();
    // ....
}
```

---

**Dispositivos suportados**

A tabela 4.4, apresenta a lista de dispositivos suportados nativamente. A extensão de dispositivos permite a inclusão e suporte de novos dispositivos, sendo apresentado com mais detalhes na seção 4.13.9.

**4.13.5 Comandos de Usuário**

Os desenvolvedores podem criar novos comandos, estendendo o protocolo ou usando os recursos de comandos do usuário (*User Functions*, na figura 4.11). Esse recurso permite criar novos comandos e vinculá-los à funções definidas pelo próprio usuários. A listagem 4.10, apresenta um exemplo desse recurso. Os comandos são criados usando a função

---

| Nome                        | Tipo             | Biblioteca Extra |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| Genérico Digital (1 pino)   | Atuador / Sensor | Não              |
| Genérico Analógico (1 pino) | Atuador / Sensor | Não              |
| RFID (MFRC522)              | Sensor           | Sim              |
| Servo Motor                 | Atuador          | Não              |
| Temperatura (LM35)          | Sensor           | Não              |
| Infra-Vermelho (Emissor)    | Atuador          | Sim              |
| Infra-Vermelho (Receptor)   | Sensor           | Sim              |

**Tabela 4.4** Dispositivos suportados nativamente

“`ODev.addCommand`”, definindo o nome e a função que será executada ao receber esse comando. No lado da aplicação (Java), esse comando é executado através do método: “`sendCommand("alertMode", "Your String", 5)`”. Observe que também é possível passar parâmetros para a função, e no lado do firmware os parâmetros podem ser recuperados usando as funções “`ODev.read*()`”.

#### 4.13.6 Mecanismos de leitura de sensores

O mecanismo de leitura adotado, também é um sistema baseado em eventos, ou seja, as aplicações não precisam realizar consultas para obter os valores dos sensores. Quando houver alguma alteração no valor do sensor, automaticamente o firmware envia o valor atualizado para as aplicações. Internamente, o mecanismo de leitura opera de dois modos: síncrono e assíncrono, que serão apresentados a seguir.

##### Modo Síncrono (Polling)

O mecanismo síncrono ou “polling”, é o mecanismo ativo por padrão, e por ser uma implementação mais simples, pode ser utilizado em qualquer microcontrolador, porém existem algumas limitações. Por se tratar de um mecanismo onde é preciso realizar uma leitura de todos os sensores(pinos) configurados, e comparar o valor lido com o valor atual, algum tempo será perdido lendo sensores que não alteraram seu valor, e consumindo recursos desnecessários CPU, que poderia estar desempenhando outras atividades. Dependendo do tempo da leitura dos sensores, alguma informação importante pode ser perdida. A leitura de pinos digitais e analógica é bem rápida, a leitura de um pino analógico por exemplo, demora cerca de 100 microssegundos (0.0001 s), em um



processador AVR 8-bits<sup>17</sup>.

### **Modo Assíncrono (Interrupções)**

As interrupções são sinais enviados para o microcontrolador com eventos que precisam de imediata atenção. A interrupção permite que o processador interrompa a tarefa atual, salve seu contexto, e execute uma rotina especial de interrupção, conforme na figura 4.12. Quando um dispositivo precisa de atenção ele envia um sinal para o processador que desloca a execução para rotina de interrupção (ISR). O suporte a interrupções externas (mudança nos pinos de I/O), depende do microcontrolador, alguns suportam interrupções em todos os pinos e outros suportam interrupções apenas em alguns pinos predefinidos. Para citar exemplos, o Arduino DUE (SAM3X8E ARM) possui suporte a interrupções externas em todos os pinos, já o Arduino Uno (e similares com chip ATmega328p) suporta interrupções externas apenas nos pinos 2 e 3.

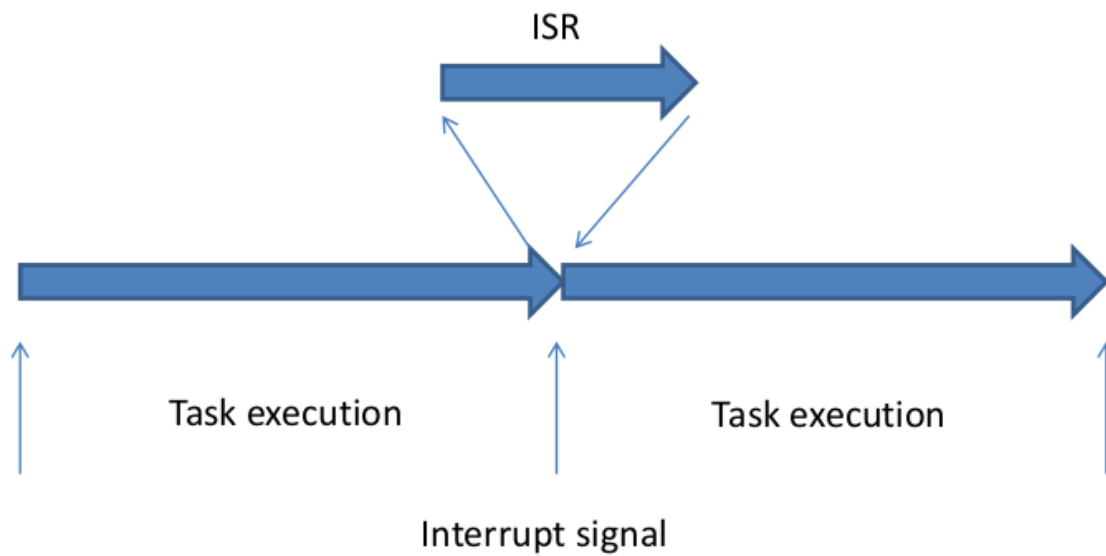
Para lidar com as limitações encontradas, o firmware utiliza uma biblioteca<sup>18</sup> que permite habilitar a associação de rotinas de interrupções individuais para todos os pinos do microcontrolador, fazendo o gerenciamento do estado dos pinos. Algumas limitações também são encontradas nessa alternativa. O tempo de interrupção pode sofrer atrasos na ordem de alguns micro-segundos para pinos que não suportem nativamente as interrupções externas. Dependendo da aplicação isso pode ser relevante. Uma análise realizada dos tempos de tratamento das interrupções, nessa implementação, é apresentada em [133].

Para habilitar o suporte a interrupções em um sensor é preciso habilitar o recurso nas configurações gerais e ativar os sensores que serão lidos com base nas interrupções. Com base no exemplo da listagem 4.11, quando ocorre alguma interrupção nos sensores configurados, os valores deles são lidos pela rotina “*OpenDeviceClass::onInterruptReceived()*”, e marcados para sincronização, que irá ocorrer no ciclo de “loop”. Um ponto importante é que os dados não podem ser enviados na rotina de interrupção, pois ela deve ocorrer o mais rápido possível, evitando problemas na leitura de outras interrupções e podem ocasionar conflitos com as interrupções de leituras das portas seriais. Detalhes de execução desse fluxo serão apresentados na seção 4.14.4.

---

<sup>17</sup><https://www.arduino.cc/en/Reference/analogRead>

<sup>18</sup><https://github.com/GreyGnome/EnableInterrupt>



**Figura 4.12** Execução de uma interrupção

---

**Listagem 4.11** Leitura usando interrupções (Arduino/C++)

---

```
#include <EnableInterrupt.h>
#include <OpenDevice.h>

void setup() {
    // Modo 1
    ODev.addSensor(3, Device::DIGITAL)->enableInterrupt(CHANGE);
    // ID:1
    // Modo 2
    Device *s2 = ODev.addSensor(4, Device::DIGITAL); // ID:2
    *s2->enableInterrupt(CHANGE);

    ODev.begin();
}

void loop() {
    ODev.loop();
}
```

---

---

### 4.13.7 Configuração dinâmica e parametrizações

O firmware tenta detectar o hardware e as bibliotecas utilizadas e realizar as parametrizações necessárias, necessitando o mínimo de configurações possíveis. Um exemplo da técnica é apresentado na listagem 4.12, onde a implementação da Ethernet é alterada apenas escolhendo o “*include*” correspondente, sem necessidade de alterações no código. As duas implementações são totalmente diferentes, porém essas diferenças são abstraídas pelo firmware, permitindo que o desenvolvedor foque na lógica do sistema.

Algumas parametrizações e valores padrão, como velocidade, portas, tamanhos dos *buffers* de recepção de dados, podem ser ajustados no arquivo: “config.h”, bem como é possível habilitar o modo de depuração (debug), para auxiliar na detecção de algum erro que esteja ocorrendo. As informações de depuração podem ser direcionadas para a conexão atual ou para uma porta serial do microcontrolador.

---

**Listagem 4.12** Exemplo de configuração do firmware

---

```
//#include <UIPEthernet.h> // ENC28J60
#include <Ethernet.h>
#include <OpenDevice.h>

void setup() {
    ODev.addDevice(13, Device::DIGITAL);
    ODev.begin();
}

void loop() {
    ODev.loop();
}
```

---

### 4.13.8 Monitoramento

O sistema de monitoramento permite informar às aplicações a utilização da memória RAM e EPROM do microcontrolador e monitorar os estados das conexões, utilizando um mecanismo de Keep-Alive / Heartbeat. Em algumas situações pode ocorrer que algumas das partes da comunicação fique fora de sincronia, devido a problemas no link, falhas de

---

software ou hardware. Esse estado é geralmente chamado conexão semi-aberta (half-open connection). É importante que o lado da conexão que está funcionando corretamente seja notificado ou detecte a falha da outra ponta, e tente uma reconexão ou fecha a conexão semi-aberta. Mesmo existindo mecanismos similares em alguns protocolos como o TCP/IP, ele pode não ser ideal para alguns tipos de aplicações, pois em média ele é executado em um intervalo de duas horas e não permite ajustes a nível de aplicações, necessitando de ajustes no sistema operacional[134]. Por outro lado, outras conexões (ex.: USB) não suportaram este mecanismo. Para contornar esses problemas, o recurso de Keep-Alive / Heartbeat foi implementado no firmware. Quando é habilitado o suporte ao protocolo MQTT, o mecanismo de Keep-Alive do próprio protocolo são utilizados.

Este mecanismo é implementado através do envio de comando do tipo PING, em um intervalo ajustável e aguardando seu retorno através do comando do tipo PING\_RESPONSE, podendo ser habilitado e desabilitado conforme a necessidade. Ao detectar uma falha ou estouro do tempo determinado (time-out), a aplicação ou middleware decide o que fazer com a conexão em estado inválido, se tenta uma reconexão ou finaliza a conexão, liberando os recursos alocados.

#### 4.13.9 Extensibilidade

O firmware é projetado como uma biblioteca, permitindo aos desenvolvedores facilmente customizar e criar seu próprio firmware através da inclusão do código de usuário (Sketch, vide figura 4.11). O mecanismo de conexões (Connections Framework) também é flexível, permitindo plugar novas conexões facilmente, através da extensão da classe *DeviceConnection*, ou através do mecanismo de “Custom Connections”, que permite a criação de novas conexões, sobrescrevendo métodos predefinidos usando apenas arquivos de cabeçalho (.h). Mais detalhes serão apresentados a seguir.

A classe *Device* pode ser estendida para dar suporte a dispositivos (sensores ou atuadores) mais complexos, que utilizem mais de um pino ou trabalhem com um protocolo específico (ex.: SPI, OneWire). Um exemplo de especialização desta classe é realizado pela classe *RFIDSensor*, disponível nas bibliotecas do firmware, que permite a integração de um sensor RFID de proximidade (baseado no chip MFRC522). A inclusão de novos dispositivos, é realizada estendendo a classe *Device* e implementando os métodos “setValue” e “hasChanged”.

Outro método de inclusão de novos dispositivos, mais especificamente sensores, permite a integração com sensores mais complexos (que utilizem um protocolo específico), de uma forma simplificada e sem a necessidade de estender a classe `Device`, facilitando assim a integração e testes. A listagem 4.13 apresenta um exemplo deste recurso, onde a leitura do sensor é implementada por um método definido pelo usuário no programa principal (Sketch), onde o método deve retornar a leitura do sensor. O firmware é responsável por executar esse método e verificar se houve alguma mudança no valor do sensor, caso exista alguma alteração, as aplicações são notificadas.

---

**Listagem 4.13** Suporte a novos sensores

---

```
void setup() {
    ODev.addSensor(readRfid); // ID:1
    // ... sensor setup ...
    ODev.begin();
}

unsigned long readRfid() {
    // sensor logic
}
```

---

**Mecanismo “Custom Connections”**

Nativamente o *firmware* suporta qualquer conexão que estenda a classe *Stream* (do Arduino). Caso seja necessário a inclusão de outro mecanismo de comunicação, onde a biblioteca projetada para o mesmo não implemente a classe *Stream*, um “adaptador” pode ser criado para essa conexão. Exemplos dessa implementação são encontrados no próprio firmware (arquivo: `EthernetServerConnection.h`) e a estrutura básica é apresentada na listagem 4.14. A vantagem é que não é necessária a criação de classes (C++), necessitando apenas de um arquivo de cabeçalho (.h). Ao realizar a inclusão deste cabeçalho no programa, o firmware automaticamente detecta que deve ser usado essa conexão e realiza as chamadas dos métodos implementados. É importante que a classe retornada pelo método “`_loop()`”, seja uma instância e estenda a classe “*Stream*” para que o mecanismo funcione.

---

**Listagem 4.14** Exemplo do mecanismo “Custom Connections”

---

```
#define USING_CUSTOM_CONNECTION 1
#define CUSTOM_CONNECTION_CLASS YourClassExtendStream

void custom_connection_begin() {

}

CUSTOM_CONNECTION_CLASS
    custom_connection_loop(DeviceConnection *conn) {
    return // return instance of YourClassExtendStream;
}
```

---

## 4.14 Fluxo de Mensagens

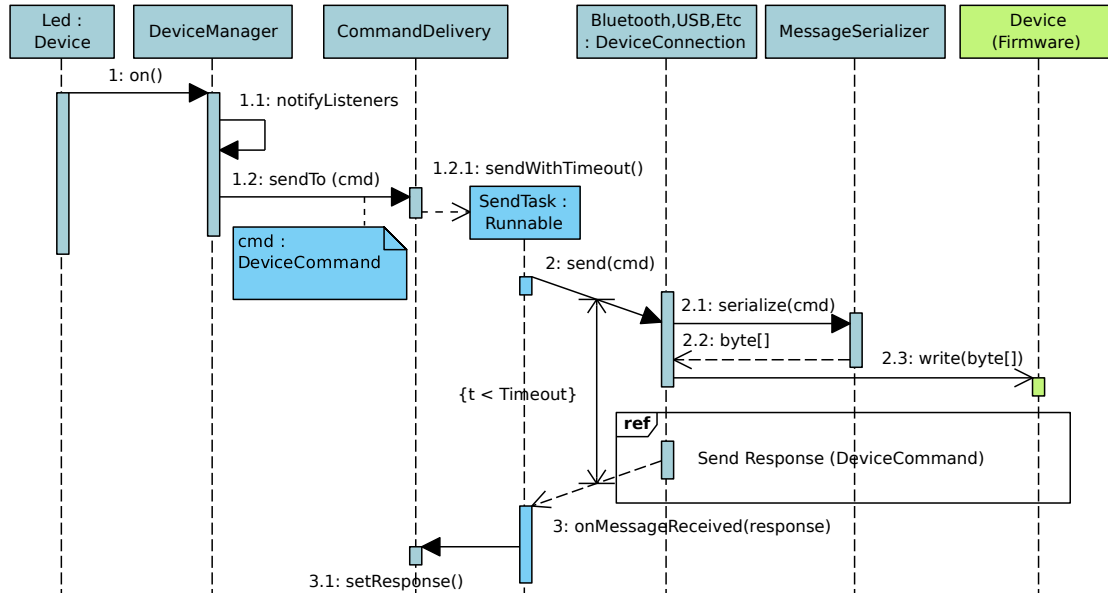
Nesta seção abordamos os principais fluxos de execução, encontrados no firmware, middleware e aplicações, auxiliando a entender o processo interno de execução e quais componentes são utilizados em cada etapa.

### 4.14.1 Envio de Comandos

A figura 4.13, apresenta o fluxo de envio de comandos entre uma aplicação, que se comunica diretamente com os dispositivos (firmware). A primeira etapa inicia com a abstração do dispositivo e a execução do seu método “on” ou “setValue” (ex.: led.on()). Esse método gera um evento que é capturado pelo framework (fluxo 1), através da classe *DeviceManager*, que cria o comando apropriado, no caso o *DeviceCommand*, e inicializa com as informações do ID do dispositivo, tipo (ANALOG ou Digital) e valor e repassa para o *CommandDelivery* (fluxo 1.2), que cuida do envio para as conexões de saída de modo assíncrono, usando a *SendTask*. As mensagens são serializadas para o formato do protocolo (4.15) do OpenDevice usando o *MessageSerializer*. Cada comando enviado, recebe um ID (TrackingID), que é gerenciado pelo *CommandDelivery*, e é usado para fazer o mapeamento dos comandos enviados e comandos recebidos (fluxo 2 e 3). O ID do comando é gerado de forma sequencial, até um limite estabelecido pelo protocolo, depois

---

é reiniciado a contagem. A *SendTask*, é registrada para receber os eventos das conexões. Quando a resposta é recebida pela conexão, o método “onMessageReceived” (fluxo 3) é executado, e a resposta é mapeada para o comando enviado.



**Figura 4.13** Envio de Comandos

#### 4.14.2 Processamento dos Comandos (Dispositivo)

A figura 4.14, demonstra o fluxo de execução do firmware, para realizar a leitura dos comandos das aplicações (ou do middleware), transforma-lo em ações reais.

Os comandos recebidos são tratados por uma implementação da classe *Stream* (fluxo 1), que pode ser uma implementação nativa do Arduino, como a *Serial* ou *EthernetClient*, ou uma implementação disponibilizada por uma biblioteca de terceiros, que implementa outra tecnologia de comunicação. Geralmente esses dados são armazenados em um buffer, de software ou de hardware, e serão lidos no ciclo de “loop” do programa principal, através da chamada do “checkDataAvailable” (fluxo 2), que ao identificar o final da mensagem especificado no protocolo, faz a desserialização através do método “parseCommand” (fluxo 2.3), e repassa para a classe principal da biblioteca do OpenDevice (fluxo 2.4), que verifica que tipo de comando foi recebido e faz o tratamento adequado. Caso a mensagem recebida (fluxo 2.4), seja um *DeviceCommand* (Ex.: Analogic ou Digital), o dispositivo relacionado é localizado através do “DeviceID”, e em seguida seu valor é alterado (fluxo 3), conforme o valor recebido pelo comando. Em seguida a implementação do Device

determina como será o tratamento para o valor recebido. Por exemplo, se o dispositivo for um dispositivo do tipo DIGITAL, a implementação chama o método “digitalWrite” da API do Arduino, caso seja um Device do tipo ANALOG, a implementação chama o método “analogWrite”.

Quando um comando é recebido com sucesso e o dispositivo relacionado é encontrado, uma resposta é enviada para a aplicação (fluxo 4.1.1), informando o estados da execução. Essa resposta é encapsulada através da classe *ResponseCommand*, podendo ter vários status, conforme a tabela 4.9, na seção referente ao protocolo (4.15).

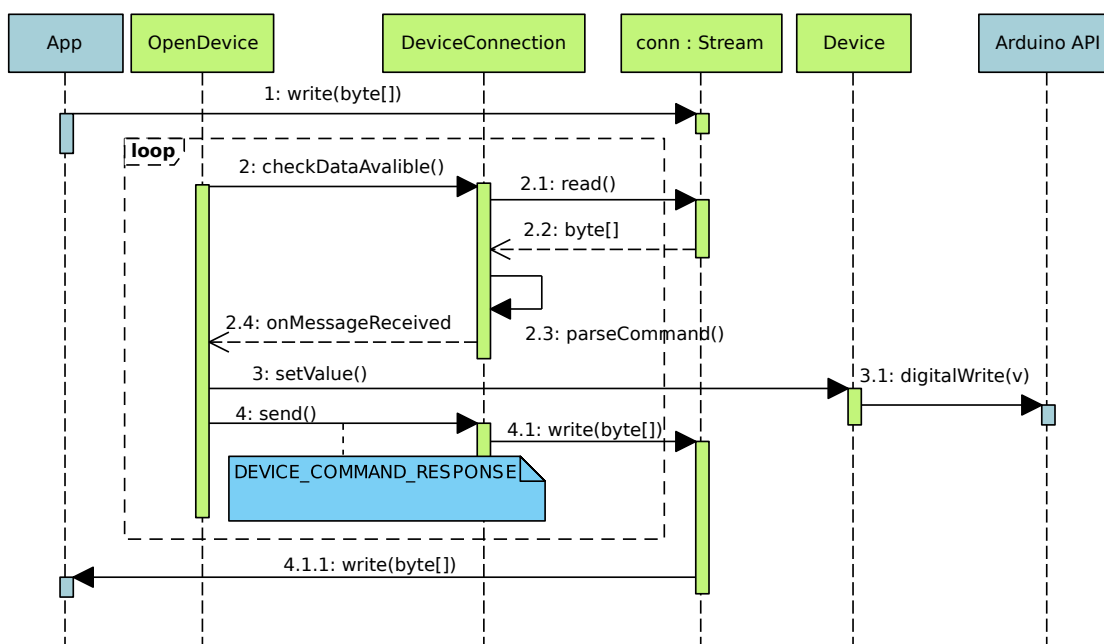


Figura 4.14 Processamento dos Comandos

### 4.14.3 Recebimento de Comandos

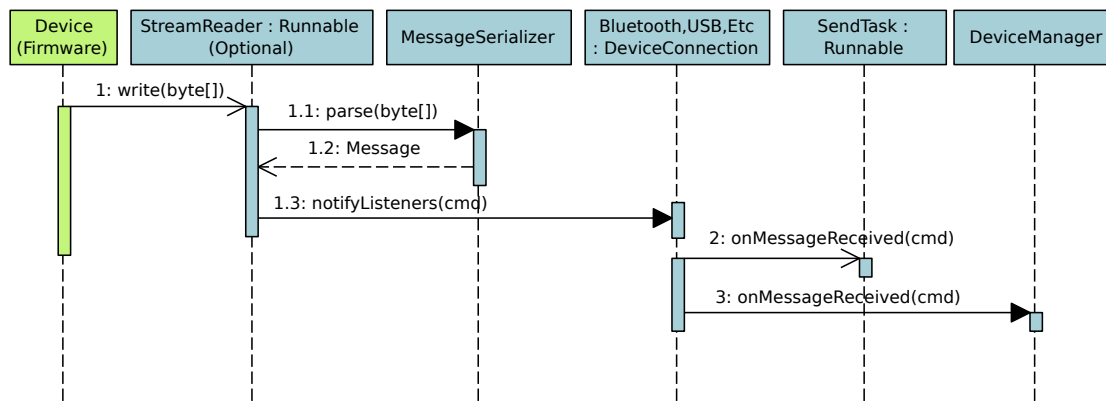
O diagrama de sequência apresentado na figura 4.15, trata-se da continuação do fluxo, quando o dispositivo (firmware) devolve a resposta com o status da execução do comando para a aplicação ou middleware. O componente que fará a leitura dos dados brutos, depende da implementação da conexão. No exemplo da figura, foi utilizando um *StreamReader*, mais especificamente *CommandStreamReader*, que é a implementação base para lidar com as conexões implementados no módulo CONNECTION-STREAM (USB e Bluetooth por exemplo). Essa implementação em específico, utiliza uma “thread” para leitura dos dados de cada conexão, e ao identificar o recebimento do pacote completo,



ele notifica a conexão (fluxo 1.3), que por sua vez notifica os componentes interessados (fluxos 2 e 3).

Quando se trata de uma resposta de um comando, por exemplo `DeviceCommand`, a `SendTask`, criada e gerenciada pelo `CommandDelivery`, é notificada e atualiza o status do comando que foi enviado, com base do ID do comando (`TrackingID`) e faz a liberação (remove a trava) do comando.

Caso não seja uma resposta de um comando, por exemplo a leitura de um sensor, o `CommandDelivery` não é utilizado. O responsável por tratar esse comando é o `DeviceManager`, como será visto na seção seguinte (4.14.4).



**Figura 4.15** Recebimento de Comandos

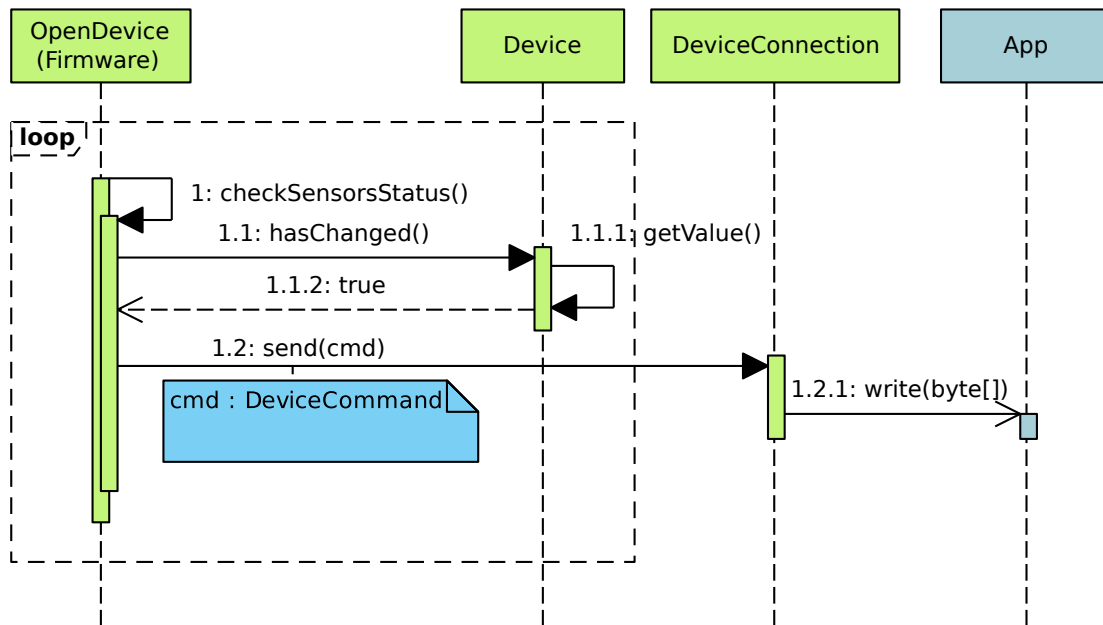
#### 4.14.4 Leitura de Sensores

O fluxo da leitura de sensores, apresentados nas figuras 4.16 e 4.17, trata-se também de um fluxo de recebimento de comandos, é similar ao da figura 4.15. Como abordamos na seção 4.13.6, o sistema de leitura de sensores é implementado de dois modos: síncrono (polling) e assíncrono (interrupções). O modo utilizado depende do suporte que o *hardware*. Como exemplo, utilizamos um microcontrolador AVR 8Bits (ex.: Arduino), executando o firmware, e enviando os dados dos sensores para a aplicação (ou middleware).

##### Leitura Síncrona (Polling)

No modo síncrono, a leitura dos sensores é feito no “loop” principal, e é realizada pela classe `OpenDevice`, através do método “`checkSensorsStatus()`” (fluxo 1). Neste método

todos os sensores serão lidos de forma sequencial, através do método “hasChanged()” da classe Device. Ao executar esse método o valor do dispositivo é atualizado, e caso tenha sofrido alguma alteração (fluxo 1.1.2), um comando (*DeviceCommand*) com o ID do dispositivo e valor lido é enviado para a conexão (fluxo 1.2), que cuida de serializar e enviar os dados para a aplicação.

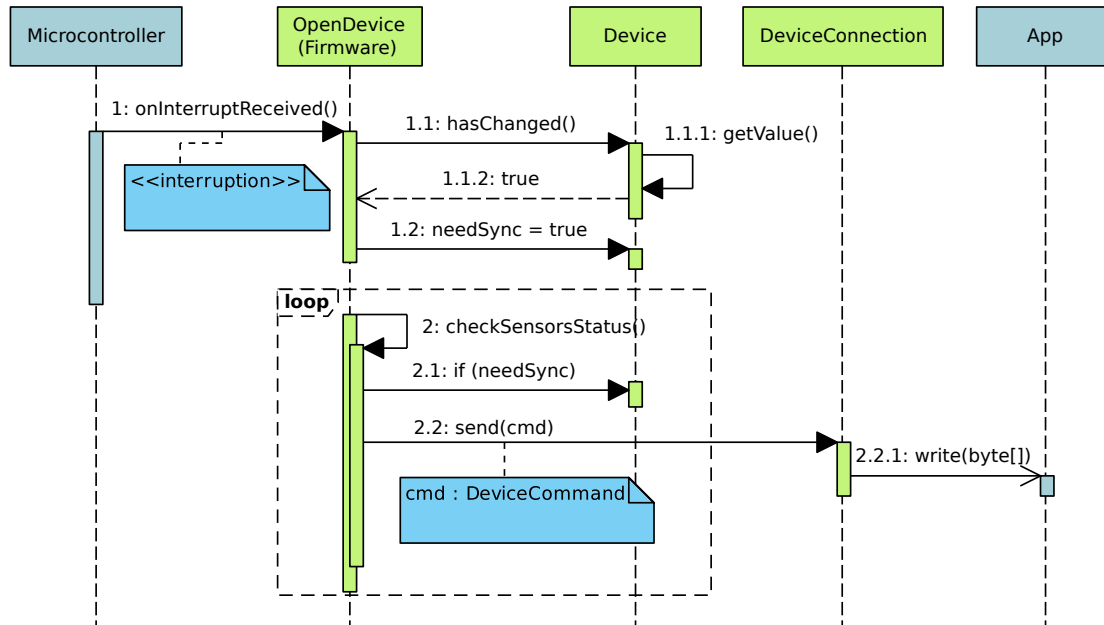


**Figura 4.16** Leitura de Sensores no modo Polling

### Leitura Assíncrona (Interrupções)

O método de leitura assíncrona, apresentado na figura 4.17, é realizado através de interrupções, como mencionamos na seção 4.13.6. Quando habilitado o suporte a interrupções, a classe OpenDevice é registrada para receber as interrupções através do método “onInterruptReceived()”. Neste método o dispositivo correspondente ao pino que sofreu a interrupção é localizado, e seu valor é atualizado. Os dispositivos que sofrerem alterações nos seus valores durante a interrupção, são marcados para sincronização (fluxo 1.2), que irá ocorrer na próxima execução do “loop” principal do programa. Similar à leitura síncrona, o método “checkSensorsStatus()” é chamada no “loop”, porém neste caso não é feita nenhuma leitura dos pinos, apenas o envios das informações para dos dispositivos que sofreram alterações para a aplicação (fluxo 1.2 e 2.1). A vantagem neste caso é que enquanto estão sendo enviadas as informações para aplicação, caso algum dispositivo tenha seu valor alterado, a interrupção cuida de deslocar o fluxo de execução, salvar esse

valor e retornar para a serialização dos dados. Na implementação no modo síncrona (polling), esse valor seria perdido.



**Figura 4.17** Leitura de Sensores usando Interrupções

#### 4.14.5 Envio de Comandos (Aplicação - Middleware - Dispositivo)

A figura 4.18, apresenta o fluxo de execução de um comando enviado por uma aplicação cliente (WebApp) para os dispositivos, através do middleware. O framework trabalha com dois conceitos de conexões: (1) conexões de entrada, ou seja, os servidores e (2) conexões de saída, geralmente as conexões com os dispositivos físicos. O componente representado em “WSServerConnection”, é um servidor WebSocket disponibilizado pelo módulo REST-WS-SERVER, que atua como uma conexão de entrada. A aplicação web no exemplo, está utilizando a biblioteca OPENDEVICE-JS, uma das implementações de cliente usando WebSocket, permitindo a conexão de forma simples com o servidor, e oferecendo a abstração dos dispositivos para a camada Web.

Ao alterar o valor de algum dispositivo na camada Web, que pode ser através dos métodos nos objetos JavaScript (fluxo 2), ou através de métodos disponibilizados no OPENDEVICE-JS, um comando é enviado via WebSocket para o Middleware (fluxo 2.1). A representação da conexão com o cliente “WSResource” recebe o comando (fluxo 2.1.1) e notifica para o DeviceManager (fluxos 2.1.2 e 2.1.2.1), que faz a atualização do dispositivo

relacionado ao comando recebido, salva no histórico de alterações, e repassa o comando para os dispositivos físicos através das conexões de saída. O procedimento de envio, representado na imagem pelo bloco “Ref: Send Command”, é o mesmo procedimento realizado no fluxo apresentado na seção Envio de Comandos (4.14.1).

O recebimento da resposta do dispositivo físico (fluxo 3), é redirecionado para a conexão de origem (WSResource). O redirecionamento é feito baseado na identificação da conexão (UUID), que é gerado no momento de sua criação (fluxo 1.1.1), e o mesmo é associado ao comando quando ele é enviado ou recebido, sendo então possível enviar a resposta para o cliente correto. Deste modo é possível permitir que múltiplas aplicações acessem o mesmo dispositivo, contornando as limitações do USB e Bluetooth que permitem apenas um cliente, ou mesmo de conexões Ethernet ou Wi-Fi, que dependendo do hardware, podem suportar apenas um cliente ou um número limitado.

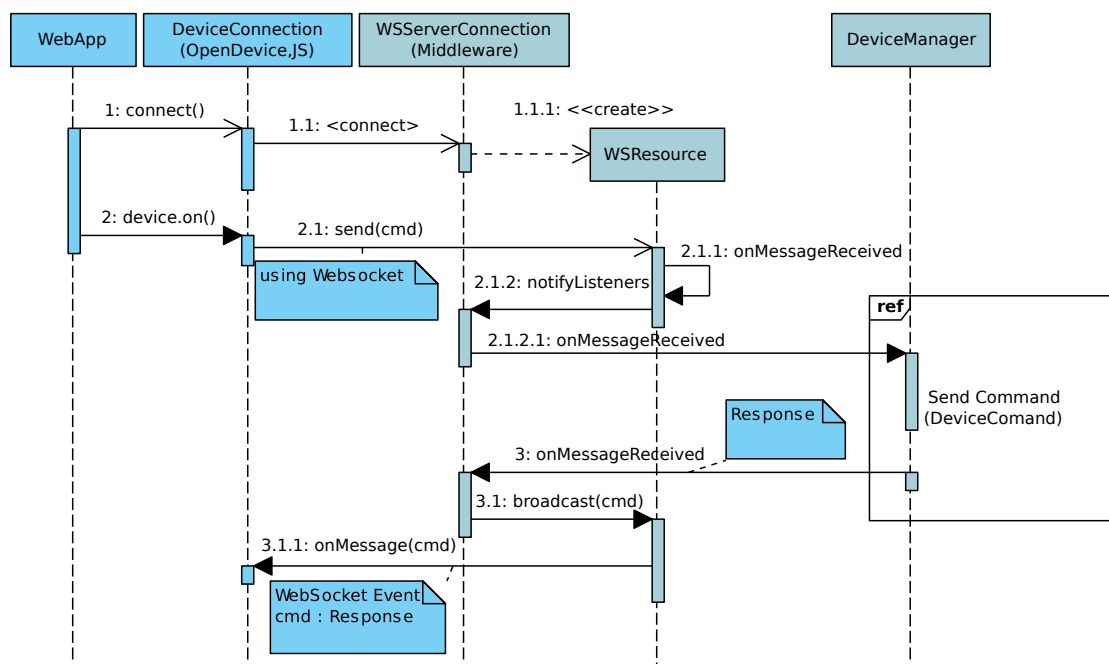


Figura 4.18 Envio de comandos

## 4.15 Protocolo

Esta seção apresenta o protocolo do OpenDevice. As principais características do protocolo é que ele foi projetado para ser um protocolo aberto, leve, simples, de fácil

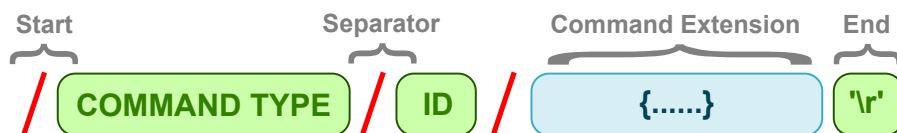
implementação, legível para humanos e voltado para dispositivos com restrições de memória e processamento, como por exemplo, microcontroladores (AVR 8-bits, 2Kb de RAM).

O protocolo é baseado em ASCII (assim como o HTTP), orientado a mensagens/comandos e assíncrono. Surgiu de algumas influências do protocolo MIDI (formato usado para comunicação com instrumentos musicais) e do protocolo REST na sua estrutura básica.

O protocolo foi projetado para permitir a abstração, controle de dispositivos (atuadores), realizar a leitura de sensores e ser de fácil extensão, mas não limitado a isto. Ele pode ser utilizado em conjunto com outros protocolos, como WebSocket e MQTT, e com outras tecnologias de comunicação, como: USB, Bluetooth, Ethernet, Wi-Fi, etc.

#### 4.15.1 Formato da Mensagem

Os comandos do OpenDevice possuem um “cabeçalho” fixo, contendo o tipo do comando (*CommandType*) e o ID do comando, em seguida, o bloco “*Command Extension*”, que varia de acordo com o tipo de comando.



**Figura 4.19** Formato do protocolo OpenDevice

- O **tipo do comando** define a estrutura do bloco “*Command Extension*”. Os tipos suportados estão definidos na tabela 4.5.
- O **ID** do comando é numérico, sequencial e gerenciado pela aplicação cliente. Ele serve para a aplicação identificar o retorno(resposta) de algum comando enviado. Quando atinge seu valor máximo a contagem reinicia.
- Os blocos do comando são separados através do caractere “/”.
- O comando finaliza com o terminador “\r” (Carriage return).

**OBSERVAÇÃO:** Na implementação atual do firmware, tanto o “tipo do comando” quanto o “id”, são armazenados em variáveis de 8bits (uint8\_t / byte), limitando a valores na faixa

de 0 a 255. Porém, os mesmos são parametrizados podendo escolher outros tipos como: `uint16_t` ou `uint32_t`.

### **Convenções e pontos em aberto**

Algumas convenções foram adotadas para determinar observações, e destacar pontos em aberto. Caso o texto apresente “[\*Numero]”, significa que deve ser verificado as observações abaixo:

- Observação [\*1]: Na implementação atual do firmware, o “DeviceID” é armazenado em uma variável de 8bits (byte), porém, o tipo é parametrizável.
- Observação [\*2]: Significa que o parâmetro ou tipo é configurável.
- Observação [\*3]: Significa que a versão atual do firmware não implementa o recurso.

### **4.15.2 Tipos de Comandos**

A tabela [4.5](#), apresenta os tipos de comandos suportados.

| Código  | Tipo de Comando         | Ref.                    | Formato  |
|---------|-------------------------|-------------------------|--|
| 1       | DIGITAL                 | <a href="#">4.15.3</a>  | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ value }                                   |
| 2       | ANALOG                  | <a href="#">4.15.4</a>  | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ value }                                   |
| 3       | NUMERIC                 | <a href="#">4.15.5</a>  | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ value }                                   |
| 4...9   | [Reservado]             |                         | –  |
| 10      | COMMAND_RESPONSE        | <a href="#">4.15.6</a>  | [#/#]/{{ status }}/{ DeviceID? }                                 |
| 11      | SET_PROPERTY            | <a href="#">4.15.7</a>  | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ property }/{ value }                      |
| 12      | GET_PROPERTIES          | <a href="#">4.15.8</a>  | [#/#]/{{ DeviceID }}   |
| 13      | GET_PROPERTIES_RESPONSE | <a href="#">4.15.9</a>  | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ [ property1: value ], ..., N }            |
| 14      | ACTION                  | <a href="#">4.15.10</a> | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ action }/{ [ value1? ], ..., { valueN } } |
| 15      | GET_ACTIONS             | <a href="#">4.15.11</a> | [#/#]/{{ DeviceID }}   |
| 16      | GET_ACTIONS_RESPONSE    | <a href="#">4.15.12</a> | [#/#]/{{ DeviceID }}/{ [ action1 ], { actionN } }                |
| 16...19 | [Reservado]             |                         | –  |
| 20      | PING_REQUEST            | <a href="#">4.15.13</a> | [#/#][somente cabeçalho]   |
| 21      | PING_RESPONSE           | <a href="#">4.15.14</a> | [#/#][somente cabeçalho]   |
| 22      | DISCOVERY_REQUEST       | <a href="#">4.15.15</a> | [#/#][somente cabeçalho]   |
| 23      | DISCOVERY_RESPONSE      | <a href="#">4.15.16</a> | [#/#]/{{ name }}/{ port }/{ deviceLength }                       |
| 24...29 | [Reservado]             |                         | –  |
| 30      | GET_DEVICES             | <a href="#">4.15.17</a> | [#/#]/{{ DeviceID? }}/{ value? }                                 |
| 31      | GET_DEVICES_RESPONSE    | <a href="#">4.15.18</a> | [#/#]/[ { DeviceInfo1 }, { DeviceInfoN? } ]                      |
| 32      | DEVICE_ADD              | <a href="#">4.15.19</a> | [#/#]/{{ DeviceInfo }}   |
| 33      | DEVICE_DEL              | <a href="#">4.15.20</a> | [#/#]/{{ DeviceID? }}  |
| 41..100 | [Reservado]             |                         |  |

Tabela 4.5 Tipos de comandos do protocolo

### 4.15.3 Comando: DIGITAL

Este comando permite controlar os dispositivos digitais (atuadores) ou notificar alguma mudança no estado/valor de um sensor. O comando adiciona dois blocos adicionais: DeviceID e Value (Figura 4.20).

Ao enviar um comando para um dispositivo, por exemplo, ligar lâmpada, o dispositivo deve retornar uma resposta (geralmente assíncrona), com o status do comando.

O formato da resposta é definida em “[Reposta: COMMAND\\_RESPONSE](#)”, onde o ID da resposta será o mesmo ID do comando enviado.

**Figura 4.20** Comando: DIGITAL

| Parâmetro | Tipo      | Descrição  |
|-----------|-----------|--|
| DeviceID  | byte [*1] | Identificador único que representa o dispositivo |
| Value     | bool      | 0 (Desligar / Desligado) ou 1 (Ligar / Ligado)   |

**Tabela 4.6** Parâmetros - Comando: DIGITAL

#### 4.15.4 Comando: ANALOG

Obedece o formato do “[Comando: DIGITAL](#)”, mudando apenas o tipo do comando, no caso 2, e o tipo de dado do bloco “*Value*”, que pode aceitar valores do tipo “*unsigned long*”, com tamanho de 32 bits (4 bytes).

Este comando pode ser utilizado tanto para sensores como para atuadores, no caso de sensores, ele é utilizado para notificar uma mudança de estado (já que sensores são apenas para “leitura”).

O formato da resposta é definida em “[Reposta: COMMAND\\_RESPONSE](#)”, onde o ID da resposta será o mesmo ID do comando enviado.

#### 4.15.5 Comando: NUMERIC

Obedece o formato do “[Comando: ANALOG](#)”. Este comando é utilizado em conjunto com os dispositivos (principalmente sensores) do tipo *NUMERIC*, que permitem o envio de informações repetidas. Um exemplo, o sensor RFID, que gera um evento toda vez que uma etiqueta é lida, mesmo sendo a mesma etiqueta.

#### 4.15.6 Reposta: COMMAND\_RESPONSE

Representa a resposta de um determinado comando. As respostas são associadas ao comando que a originou (requisição), através do atributo “ID” do cabeçalho fixo. Adi-



cionalmente os comandos que referenciam um dispositivo, na resposta, será incluído o mesmo “DeviceID” do comando da “requisição”.

|        |        |          |
|--------|--------|----------|
| HEADER | Status | DeviceID |
|--------|--------|----------|

**Tabela 4.7** Reposta: COMMAND\_RESPONSE

| Parâmetro | Tipo                 | Descrição  |
|-----------|----------------------|--|
| ID        | byte [*2]            | Mesmo ID enviado na requisição                     |
| Status    | byte                 | Obedece aos valores da tabela: <a href="#">4.9</a> |
| DeviceID  | byte [*1] (Opcional) | Mesmo ID enviado na requisição                     |

**Tabela 4.8** Parâmetros - Comando: COMMAND\_RESPONSE

| Status                 | Código |
|------------------------|--------|
| SUCCESS                | 200    |
| NOT_FOUND              | 404    |
| BAD_REQUEST            | 400    |
| UNAUTHORIZED [*3]      | 401    |
| FORBIDDEN [*3]         | 403    |
| PERMISSION_DENIED [*3] | 550    |
| INTERNAL_ERROR         | 500    |
| NOT_IMPLEMENTED        | 501    |

**Tabela 4.9** Status da resposta do comando

#### 4.15.7 Comando: SET\_PROPERTY

Comando utilizado para atualizar alguma propriedade do dispositivo. O formato da resposta é definido em “[Reposta: COMMAND\\_RESPONSE](#)”.

|        |          |          |       |
|--------|----------|----------|-------|
| HEADER | DeviceID | property | value |
|--------|----------|----------|-------|

**Tabela 4.10** Comando: SET\_PROPERTY

| Parâmetro | Tipo      | Descrição  |
|-----------|-----------|--|
| DeviceID  | byte [*1] | Identificador único que representa o dispositivo |
| property  | String    | Propriedade a ser alterada                       |
| value     | String    | Valor da propriedade                             |

**Tabela 4.11** Parâmetros: SET\_PROPERTY

### 4.15.8 Comando: GET\_PROPERTIES

Comando utilizado para recuperar a lista de propriedades do dispositivo e seus respectivos valores. O formato da resposta é definido em “[Comando: GET\\_PROPERTIES\\_RESPONSE](#)”

|        |          |
|--------|----------|
| HEADER | DeviceID |
|--------|----------|

**Tabela 4.12** Comando: GET\_PROPERTIES

| Parâmetro | Tipo      | Descrição  |
|-----------|-----------|--|
| DeviceID  | byte [*1] | Identificador único que representa o dispositivo |

**Tabela 4.13** Parâmetros: GET\_PROPERTIES

### 4.15.9 Comando: GET\_PROPERTIES\_RESPONSE

Resposta do comando “*GET\_PROPERTIES*”, com a lista de propriedades do dispositivo. A lista é retornada no formato de um Array, e os elementos no formato: “Propriedade:Valor”.

|        |          |                                      |
|--------|----------|--------------------------------------|
| HEADER | DeviceID | [property:value,...,propertyN:value] |
|--------|----------|--------------------------------------|

**Tabela 4.14** Comando: GET\_PROPERTIES\_RESPONSE

| Parâmetro | Tipo      | Descrição  |
|-----------|-----------|--|
| DeviceID  | byte [*1] | Identificador único que representa o dispositivo |
| property  | String    | Propriedade                                      |
| value     | String    | Valor da propriedade                             |

**Tabela 4.15** Parâmetros: GET\_PROPERTIES\_RESPONSE

#### 4.15.10 Comando: ACTION

Comando usado para executar as ações definidas pelos dispositivos. As ações podem receber uma lista de valores, que são especificados em formato de Array. O formato da resposta é definido em “[Reposta: COMMAND\\_RESPONSE](#)”.

|        |          |        |                              |
|--------|----------|--------|------------------------------|
| HEADER | DeviceID | action | [{ value1 },..., { valueN }] |
|--------|----------|--------|------------------------------|

**Tabela 4.16** Comando: ACTION

| Parâmetro | Tipo                     | Descrição  |
|-----------|--------------------------|--|
| DeviceID  | byte [*1]                | Identificador único que representa o dispositivo |
| action    | String                   | Ação que deve ser executada                      |
| value     | Array[String] (Opcional) | A lista de valores que a ação recebe             |

**Tabela 4.17** Parâmetros: ACTION

#### 4.15.11 Comando: GET\_ACTIONS

Comando utilizado para recuperar a lista de ações definidas para o dispositivo. O formato da resposta é definido em “[Comando: GET\\_ACTIONS\\_RESPONSE](#)”

|        |          |
|--------|----------|
| HEADER | DeviceID |
|--------|----------|

**Tabela 4.18** Comando: GET\_ACTIONS

| Parâmetro | Tipo      | Descrição  |
|-----------|-----------|--|
| DeviceID  | byte [*1] | Identificador único que representa o dispositivo |

**Tabela 4.19** Parâmetros: GET\_ACTIONS

#### 4.15.12 Comando: GET\_ACTIONS\_RESPONSE

Resposta do comando “*GET\_ACTIONS*”, com a lista de ações do dispositivo. A lista é retornada no formato de um Array.

|        |          |                             |
|--------|----------|-----------------------------|
| HEADER | DeviceID | [[{action1 }...,{actionN}]] |
|--------|----------|-----------------------------|

**Tabela 4.20** Comando: GET\_ACTIONS\_RESPONSE

| Parâmetro | Tipo          | Descrição  |
|-----------|---------------|--|
| DeviceID  | byte [*1]     | Identificador único que representa o dispositivo |
| action    | Array[String] | Lista de ações do dispositivo                    |

**Tabela 4.21** Parâmetros: GET\_ACTIONS\_RESPONSE

### 4.15.13 Comando: PING\_REQUEST

Comando enviado pelo firmware para notificar que está em funcionamento e ao mesmo tempo monitora o status do middleware/aplicação.

Este comando não possui parâmetros adicionais, apenas cabeçalho. O formato da resposta é definido em “[Resposta: PING\\_RESPONSE](#)”

### 4.15.14 Resposta: PING\_RESPONSE

Resposta para o comando “PING\_REQUEST”. Este comando não possui parâmetros adicionais, apenas cabeçalho.

### 4.15.15 Comando: DISCOVERY\_REQUEST

Comando utilizado para realizar a descoberta de dispositivos (módulos) em uma rede. Geralmente é enviado via *broadcast*. Este comando não possui parâmetros adicionais, apenas cabeçalho.

### 4.15.16 Resposta: DISCOVERY\_RESPONSE

Resposta com as informações de descoberta dos dispositivos (módulos) .

|        |      |      |              |
|--------|------|------|--------------|
| HEADER | name | port | deviceLength |
|--------|------|------|--------------|

**Tabela 4.22** Comando: GET\_ACTIONS\_RESPONSE

| Parâmetro    | Tipo          | Descrição                                       |
|--------------|---------------|---|
| name         | String        | Nome do dispositivo (módulo)                    |
| port         | Array[String] | Lista de ações do dispositivo                   |
| deviceLength | int           | Quantidades de dispositivos que o módulo possui |

**Tabela 4.23** Parâmetros: GET\_ACTIONS\_RESPONSE

### 4.15.17 Comando: GET\_DEVICES

Comando usado para obter informações de um ou mais dispositivos. Os campos 'DeviceID' e 'Valor' são opcionais e podem ser usados como filtro para o comando.

|        |          |       |
|--------|----------|-------|
| HEADER | DeviceID | Value |
|--------|----------|-------|

**Tabela 4.24** Comando: GET\_DEVICES

| Parâmetro           | Tipo                 | Descrição                                    |
|---------------------|----------------------|--|
| DeviceID (Opcional) | byte [*1]            | Informar o ID do dispositivo ou 0 para todos |
| Value (Opcional)    | <i>unsigned long</i> | Permite filtrar por valor ou 0 para todos    |

**Tabela 4.25** Parâmetros: GET\_DEVICES

### 4.15.18 Resposta: GET\_DEVICES\_RESPONSE

Resposta do comando “GET\_DEVICES”, com a lista de dispositivos cadastrados. O bloco “*Command Extension*”, consiste em um Array de objetos do “**Tipo: DeviceInfo**”, separados por “,”. A quantidade de dispositivos deve ser inferida automaticamente.

|        |                              |
|--------|------------------------------|
| HEADER | [DeviceInfo,...,DeviceInfoN] |
|--------|------------------------------|

**Tabela 4.26** Resposta: GET\_DEVICES\_RESPONSE

| Parâmetro  | Tipo              | Descrição                                      |
|------------|-------------------|--|
| ID         | byte [*2]         | Mesmo ID enviado da requisição                 |
| DeviceInfo | Array[DeviceInfo] | Lista dos atributos do <b>Tipo: DeviceInfo</b> |

**Tabela 4.27** Parâmetros - Resposta: GET\_DEVICES\_RESPONSE

#### 4.15.19 Comando: DEVICE\_ADD

Comando utilizado para configurar dinamicamente os dispositivos de um módulo. O formato da resposta é definido em “[Reposta: COMMAND\\_RESPONSE](#)”.

|        |            |
|--------|------------|
| HEADER | DeviceInfo |
|--------|------------|

**Tabela 4.28** Comando: DEVICE\_ADD

| Parâmetro  | Tipo       | Descrição   |
|------------|------------|---|
| DeviceInfo | DeviceInfo | Lista dos atributos do <a href="#">Tipo: DeviceInfo</a> |

**Tabela 4.29** Parâmetros: DEVICE\_ADD

#### 4.15.20 Comando: DEVICE\_DEL

Comando utilizado deletar o(s) dispositiv(o) de um módulo. O formato da resposta é definido em “[Comando: GET\\_ACTIONS\\_RESPONSE](#)”

|        |          |
|--------|----------|
| HEADER | DeviceID |
|--------|----------|

**Tabela 4.30** Comando: DEVICE\_DEL

| Parâmetro | Tipo                 | Descrição                                    |
|-----------|----------------------|--|
| DeviceID  | byte [*1] (Opcioanl) | Informar o ID do dispositivo ou 0 para todos |

**Tabela 4.31** Parâmetros: DEVICE\_DEL

#### 4.15.21 Tipo: DeviceInfo

Representa as informações e um dispositivo. É representado como um Array no seguinte formato: [ID, PIN, VALUE, TARGET, SENSOR, TYPE].

---

| Atributo | Tipo          | Descrição  |
|----------|---------------|--|
| ID       | byte [*2]     | ID do dispositivo  |
| PIN      | byte          | Pino que o dispositivo está vinculado                      |
| VALUE    | unsigned long | Valor atual do dispositivo                                 |
| TARGET   | byte          | Quando for sensor, representa outro dispositivo (Opcional) |
| SENSOR   | bool          | 0 para atuador, 1 para sensor                              |
| TYPE     | byte          | Tipo de dispositivo (Tabela 4.33)                          |

**Tabela 4.32** Objeto: DeviceInfo

| Código | Tipo    |
|--------|---------|
| 1      | DIGITAL |
| 2      | ANALOG  |
| 3      | NUMERIC |

**Tabela 4.33** Tipos de Dispositivos

# 5

## Avaliação Experimental

Este capítulo apresenta avaliação experimental da implementação da arquitetura apresentada no capítulo 4. Os objetivos gerais desta avaliação e a estruturação da mesma são apresentados a seguir.

Na seção 5.1, foram realizados testes em diferentes hardwares, permitindo avaliar sua capacidade de adaptabilidade e compatibilidade tanto da perspectiva do middleware, quanto do firmware. Na seção 5.2, foram conduzidos testes de performance com diferentes tecnologias de comunicação e protocolos, permitindo avaliar a capacidade da arquitetura de lidar com tecnologias heterogêneas e avaliar o desempenho e latências de comunicação. A seção 5.3, apresenta experimentos de integração com ambientes de desenvolvimento de jogos 3D (*Game Engines*), *Blender* e *jMonkeyEngine*. Estas ferramentas podem ser utilizadas para criar ambientes de simulação, facilitando a criação de aplicações de IoT, sem depender de um ambiente ou hardware real. Por fim, a seção 5.4, apresenta um estudo de caso, que permite avaliar a arquitetura proposta em um contexto real. O contexto apresentado, está relacionado à automação residencial, focando, principalmente, no controle de acesso usando a tecnologia RFID.

### 5.1 Hardwares Testados

Os testes realizados com os hardware estão subdivididos nas categorias de microcontroladores (onde é executado o firmware) e os hardwares na categoria de mini PCs que possuem um poder de processamento maior e são destinados a executar o middleware ou aplicação construída utilizando o framework.



### 5.1.1 Microcontroladores (Firmware)

Apesar do firmware ser construído com base na API do Arduino, o que o tornaria automaticamente compatível com uma série de dispositivos [11, 12, 13], os testes demonstraram que alguns microcontroladores possuem peculiaridades que têm que ser levadas em consideração, principalmente pelo nível de abstração que é proposto pelo sistema de configuração dinâmico de conexões que é implementado (seção 4.13.7). Como exemplo, o firmware deve ser capaz de identificar quando estiver rodando em um ESP8266, e realizar as configurações para conexão Wi-Fi sem necessidade de modificações na aplicação/firmware.

A tabela 5.1 apresenta a lista de hardwares dessa categoria que foram testados. Em seguida é apresentada a tabela 5.2, com os módulos de conexão testados.

| Nome                | Processador                     | Arquitetura    |
|---------------------|---------------------------------|----------------|
| Arduino UNO         | ATmega328P - 16 MHz             | AVR 8-bit      |
| Arduino Nano        | ATmega328P - 16 MHz             | AVR 8-bit      |
| Arduino Leonardo    | ATmega32u4 - 16 MHz             | AVR 8-bit      |
| Arduino MEGA        | ATmega2560 - 16 MHz             | AVR 8-bit      |
| Arduino Yun         | ATmega32U4 / AR9331 Linux       | AVR 8-bit      |
| Arduino Due         | ATSAM3X8E - 84 MHz              | ARM 32-bit     |
| ESP8266             | SoC (Tensilica's L106) - 80 MHz | RISC 32-bit    |
| Stellaris Launchpad | LM4F120H5QR - 80 MHz            | ARM M4F 32-bit |
| Digispark           | ATtiny85 - 20MHz                | AVR 8-bit      |
| Teensy 3.1          | MK20DX256 - 72 MHz              | ARM M4 32-bit  |

**Tabela 5.1** Hardwares Testados (Microcontroladores)

| Módulo                  | Conexão       |
|-------------------------|---------------|
| Arduino Ethernet Shield | Ethernet      |
| Módulo ENC28J60         | Ethernet      |
| ESP8266 (AT Mode)       | Wi-Fi         |
| HC-05 / HC-06           | Bluetooth SPP |

**Tabela 5.2** Hardwares Testados (Módulos)

### 5.1.2 Mini PCs

No trabalho, nomeamos de mini PCs, os hardware capazes de executar um sistema operacional completo, como o Linux, e que possuem 512MB de memória RAM ou

superior. Hardwares baseados na arquitetura ARM são elegíveis para suporte a máquina virtual Java (JVM), consequentemente tendo suporte para execução do middleware. Entretanto a forma de acesso aos periféricos dos mesmos, como os pinos de GPIO, são específicos de cada plataforma. Não existe uma especificação genérica como a disponível no framework do Arduino, que abstraia o acesso aos pinos de GPIO de uma forma unificado. Uma proposta é *API Device I/O*[39], porém, é uma especificação nova e sua compatibilidade é limitada.

| Nome                         | Arquitetura | RAM   |
|------------------------------|-------------|-------|
| Raspberry Pi Model B (Alpha) | ARM         | 256MB |
| BeagleBone Black             | ARM         | 512MB |

**Tabela 5.3** Hardwares Testados (Mini PCs)

## 5.2 Testes de Performance

O objetivo deste experimento é avaliar a performance do middleware, implementações das tecnologias de comunicação e do firmware.

### 5.2.1 Procedimento de Medição

Os experimentos foram executados através da ferramenta JMH<sup>1</sup>, que permite a criação de *micro-benchmarks* em Java, isolando alguns comportamentos da JVM, aproximando ao máximo de um ambiente real.

Os seguintes parâmetros de configuração foram utilizados na execução dos testes:

- Iterações de pré-execução: 2;
- Tempo de execução das iterações de pré-execução: 2s;
- Iterações de coleta de dados: 20;
- Tempo de cada iteração: 1s;
- Argumentos da JVM: “-server”.

---

<sup>1</sup><http://openjdk.java.net/projects/code-tools/jmh/>

As iterações de “pré-execução” são utilizadas para garantir que a JVM, todas as classes da aplicação e bibliotecas, sejam carregadas completamente, evitando interferência de acesso ao disco.

Em cada iteração de coletas de dados são enviados um série de comandos (*Device-Command*) para os dispositivos, durante o período definido (1s). Em cada iteração, são enviados o máximo de comandos possíveis de forma sequencial e síncrona, permitindo calcular o tempo médio de resposta de cada comando.

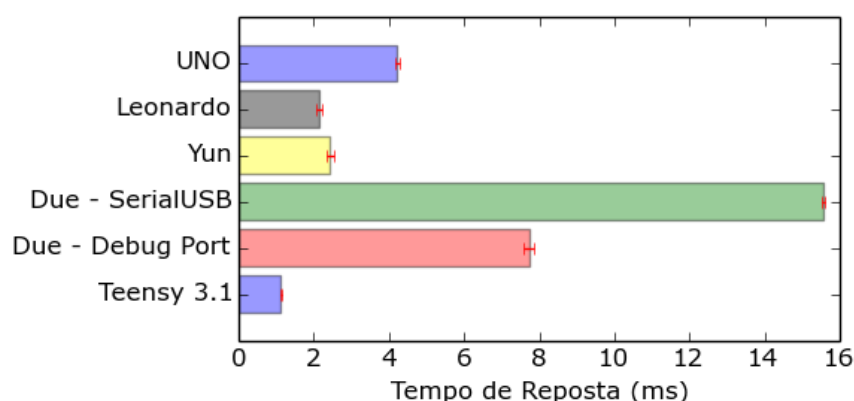
Ao final de todas iterações definidas (20), as estatísticas são geradas pela ferramenta.

### 5.2.2 Métrica Utilizada

A métrica utilizada é o tempo de resposta fim-a-fim. Após todas iterações serem executadas, é calculado o tempo médio de resposta de cada iteração e em seguida, o tempo médio de reposta geral de todas iterações e o erro médio.

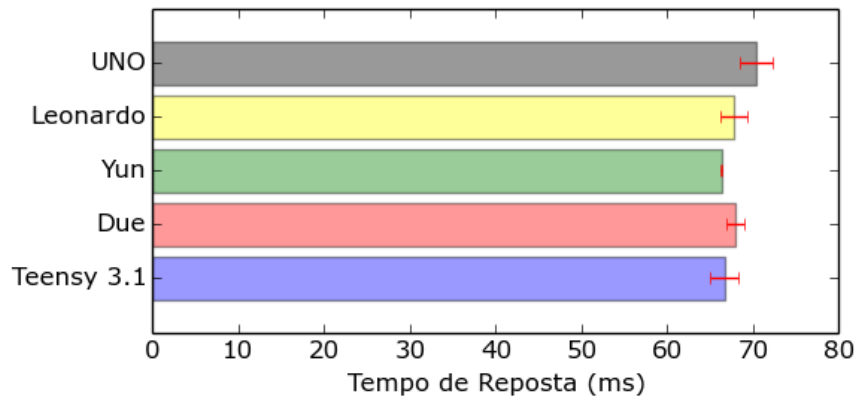
O tempo de resposta, inclui o tempo para geração da mensagem no middleware, transmissão, processamento e execução da ação no dispositivo e recebimento da resposta.

### 5.2.3 Resultados: Conexão USB



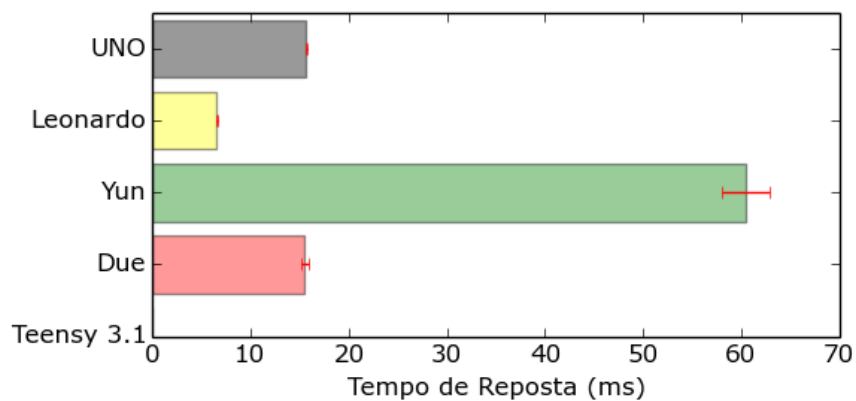
**Figura 5.1** Teste de performance - USB

#### 5.2.4 Resultados: Conexão Bluetooth



**Figura 5.2** Teste de performance - Bluetooth

#### 5.2.5 Resultados: Conexão Ethernet



**Figura 5.3** Teste de performance - Ethernet

### 5.3 Integração com Ambientes 3D

O desenvolvimento de aplicações para Internet das Coisas conta com o desafio de ter que lidar com vários dispositivos físicos. Como alternativa ambientes de simulação podem ser utilizados para executar os testes e experimentos, antes de testar com os dispositivos

---

reais. Outra possibilidade para utilização dos ambientes 3D, é permitir a integração entre um ambiente real e virtual.

Foram realizados testes de integração do OpenDevice com sistema de desenvolvimento de jogos (*Game Engine*), afim de validar uma possível utilização dos mesmos para criação de ambientes de simulação. Os experimentos realizados são detalhados a seguir.

#### 5.3.1 Integração - jMonkeyEngine.

A *jMonkeyEngine*<sup>2</sup> é uma ferramenta gratuita de código fonte aberto, utilizada para construção de jogos 3D em Java. Possui uma boa documentação e ambiente de desenvolvimento integrado. Devido sua implementação ser baseada na linguagem Java, a integração com o OpenDevice se torna bastante simples e permite a construção de uma aplicação de simulação que utiliza as APIs e módulos do OpenDevice diretamente, sem a necessidade do middleware.

No teste realizado, foi construída uma aplicação simples para validar a integração, que consiste no mapeamento dos dispositivos físicos, no caso 3 LEDs, e sua vinculação com objetos virtuais 3D da *Game Engine*. Ao clicar em algum objeto 3D, como os representados na figura 5.4, o OpenDevice localiza o dispositivo vinculado e envia o comando para o acionamento do dispositivo físico.

#### 5.3.2 Integração - Blender.

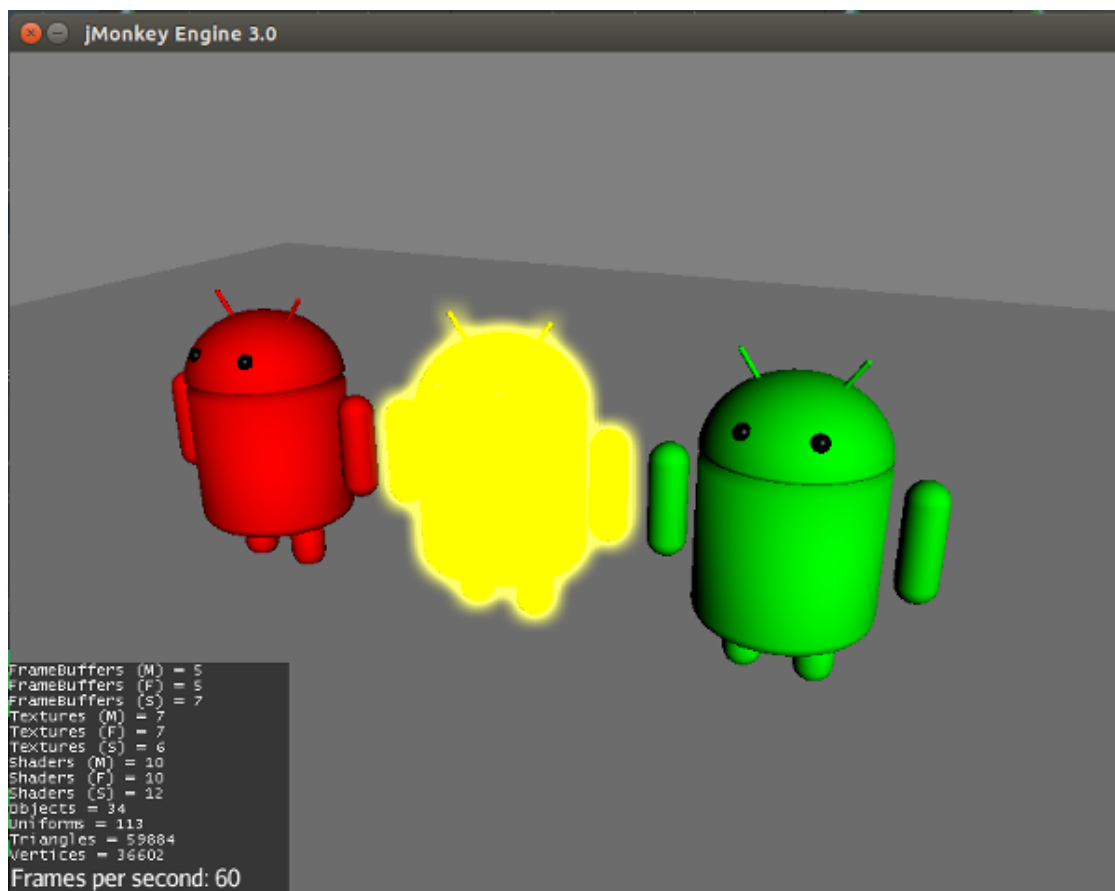
O *Blender*<sup>3</sup> é uma ferramenta livre e de código fonte aberto, escrita em sua maior parte utilizando a linguagem de programação Python. Ela possui ferramentas para modelagem, animação, renderização e desenvolvimento de Jogos. O diferencial em relação à *jMonkeyEngine*, é que o *Blender* possui uma série de facilidades para configurações de eventos e vinculações de scripts em Python utilizando apenas a interface gráfica.

Para permitir a integração com o OpenDevice, foi necessária a criação de uma biblioteca cliente em Python, que implementa o protocolo do OpenDevice e permite uma comunicação bidirecional através de uma comunicação TCP. O experimento realizado (Figura 5.5), é similar ao experimento realizado com a *jMonkeyEngine*, permitindo fazer

---

<sup>2</sup><http://jmonkeyengine.org/>

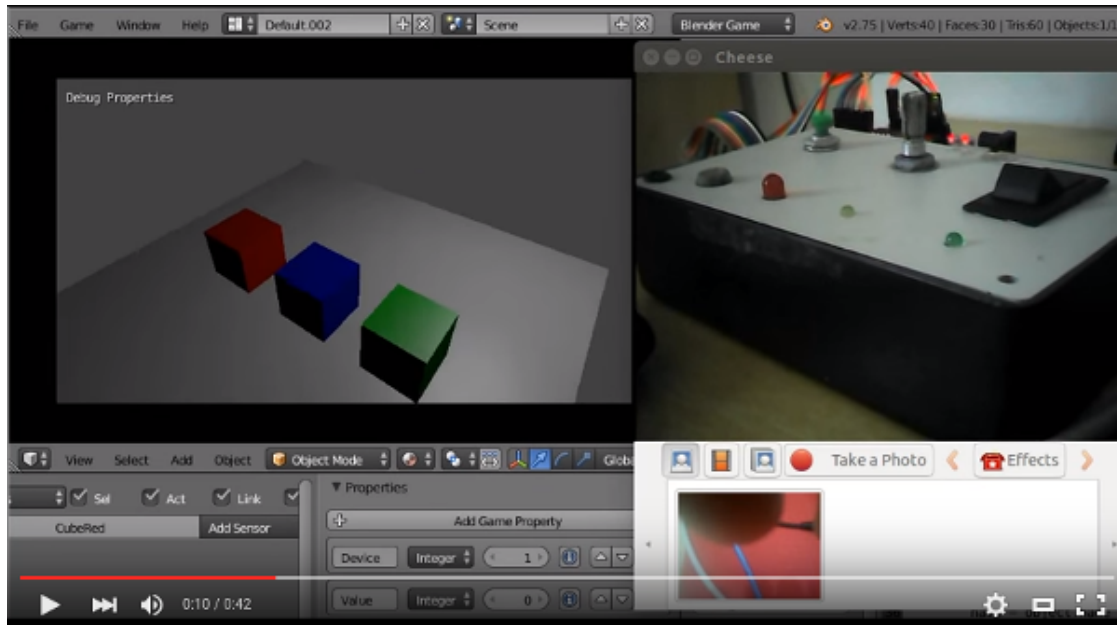
<sup>3</sup><https://www.blender.org/>



**Figura 5.4** Integração com a JMonkeyEngine

a vinculação entre objetos virtuais 3D e os dispositivos físicos<sup>4</sup>.

Para validar a performance da integração, foram realizados testes visuais do tempo de resposta entre duas aplicações gráficas (Figura 5.6), uma escrita em Java (executando o middleware) e outra Python. Verificou-se que as duas interfaces respondem em tempo real às modificações na barra de rolagem (slider) em ambas interfaces<sup>5</sup>.



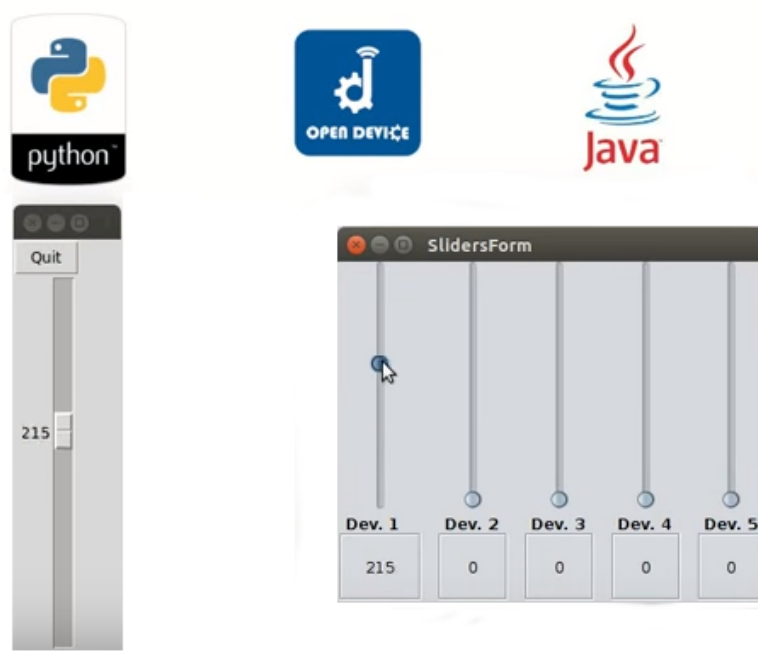
**Figura 5.5** Integração com o Blender

## 5.4 Estudo de Caso

A arquitetura descrita conforme a seção 4, foi implementada vários testes foram conduzidos para validar os componentes da arquitetura em relação ao design, integração e performance. Nesta seção, faremos um estudo de caso baseado em um cenário real, permitindo avaliar a integração entre os componentes da arquitetura e as capacidades de evolução do framework proposto.

<sup>4</sup>Vídeo do experimento da figura 5.5: <http://youtu.be/b3PbOPIMHmY>

<sup>5</sup>Vídeo do experimento da figura 5.6: <http://youtu.be/j4dMnAPZu70>



**Figura 5.6** Teste de desempenho do cliente Python

### 5.4.1 Resumo

O cenário escolhido para validação da proposta consiste em um sistema de controle de acesso, usando a tecnologia RFID e alguns elementos de automação residencial. A estratégia utilizada consiste na elaboração de um cenário mais simples e sua posterior evolução para um cenário mais complexo, integrando outros dispositivos e plataformas: Hardware, Desktop, Web/Cloud e Mobile. O projeto será implantado nas instalações do prédio denominado “GEDAI”, onde está instalada a CriativaSoft (empresa do autor) e outras duas empresas, sendo utilizado para o controle de acesso dos funcionários.

Os principais objetivos são: (1) avaliar os componentes da arquitetura em conjunto, (2) validar os modelos de comunicação Cloud e Local, (3) avaliar a integração com novos dispositivos (sensores e atuadores), (4) avaliar a integração com dispositivos IP que utilizam outros protocolos, (5) avaliar a integração com aplicações cliente Mobile(Android) e (5) avaliar as capacidades de extensibilidade da plataforma.



### 5.4.2 Ambiente de Teste

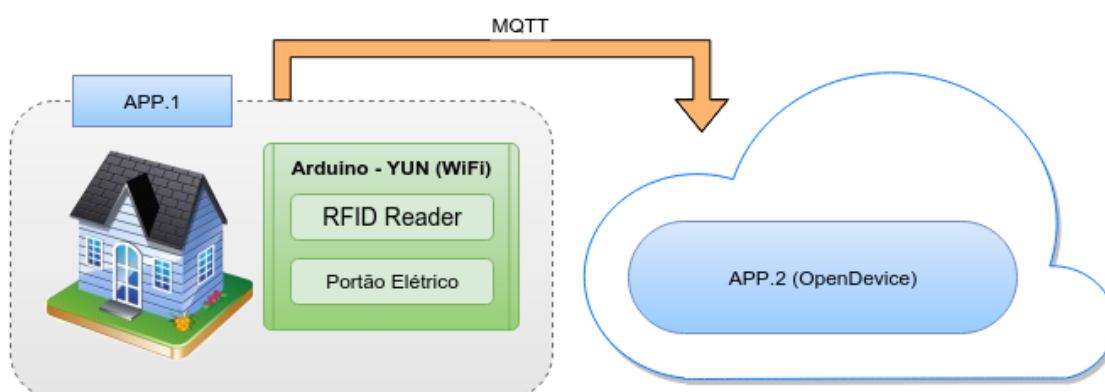
Neste experimento serão utilizados hardwares de baixo custo, como o Arduino, ESP8266 e Raspberry Pi, os demais sensores e atuadores utilizados serão descritos nas seções seguintes. O middleware foi implantado em um servidor na Amazon EC2, permitindo que aplicações cliente controlem e recebam informações dos dispositivos pela Internet.

O experimento será avaliado em dois cenários, descritos e detalhados a seguir.

### 5.4.3 Cenário 1

Este cenário tem como objetivo avaliar a utilização da arquitetura do OpenDevice para criação de projetos simples para Internet das Coisas, utilizando componente e hardwares existentes no mercado para criação de projetos inovadores. Como mencionado, este cenário consiste na criação de uma aplicação para controle de acesso usando RFID, conforme apresentado na figura 5.7. Neste cenário, o hardware está conectada à Internet através de uma comunicação Ethernet ou Wi-Fi e se comunica com o middleware utilizando o protocolo do OpenDevice em conjunto com o protocolo MQTT. Este cenário tem como característica ser um cenário de fácil implantação.

Para implementação dessa aplicação, foi utilizado o Arduino Yún, uma versão do Arduino que possui conexão Ethernet e Wi-Fi já embutidas na própria placa, e executa uma versão customizada no Linux para roteadores, o OpenWrt-Yún[135], porém é possível utilizar qualquer outra versão do Arduino, com um módulo que forneça uma comunicação IP. A leitura dos cartões de acesso é feita por um leitor RFID de proximidade que trabalha na frequência 13.56 MHz. O leitor é baseado no processador MFRC522[136] da empresa NXP, compatível com cartões/tags RFID padrão ISO 14443A. A comunicação com este leitor é realizada através do protocolo SPI[137, 138].



**Figura 5.7** Diagrama - Cenário 1

### Estruturação do projeto:

Neste cenário foram implementados duas aplicações: (1) uma aplicação embarcada (firmware), que faz o gerenciamento dos dispositivos físicos, e (2) uma aplicação Java que utiliza o framework do OpenDevice, que é a responsável pela validação dos cartões lidos. O firmware, utiliza as bibliotecas do OpenDevice, MQTT[139] e do leitor RFID (MFRC522)[140]. A aplicação Java, é uma aplicação bem simples, utilizando o módulo de servidor MQTT embarcado, o módulo core da plataforma e um banco de dados em memória chamado MapDB[141], com suporte a serialização em disco. O MapDB foi escolhido por ser o mesmo utilizado na implementação do servidor MQTT (baseado no Moquette).

### Descrição básica de funcionamento

Ao detectar a presença de alguma etiqueta/cartão RFID, o firmware envia a notificação para aplicação Java, que verifica a existência do código lido no cache em memória (aumentando a performance) e envia a resposta de confirmação de volta para o firmware, através de um comando customizado (action), chamado “*onAuthFinish*”.

Na função “*onAuthFinish*”, definida pelo firmware, ele verifica o parâmetro enviado pela aplicação, se a autenticação foi realizada, em caso positivo, é emitido um sinal sonoro e liberado a fechadura elétrica. Em caso negativo, é emitido um sinal sonoro longo e o acionamento de um LED vermelho, permitindo o usuário identificar a não autorização.

O firmware conta com uma função que emite um alerta (sonoro e visual), caso o

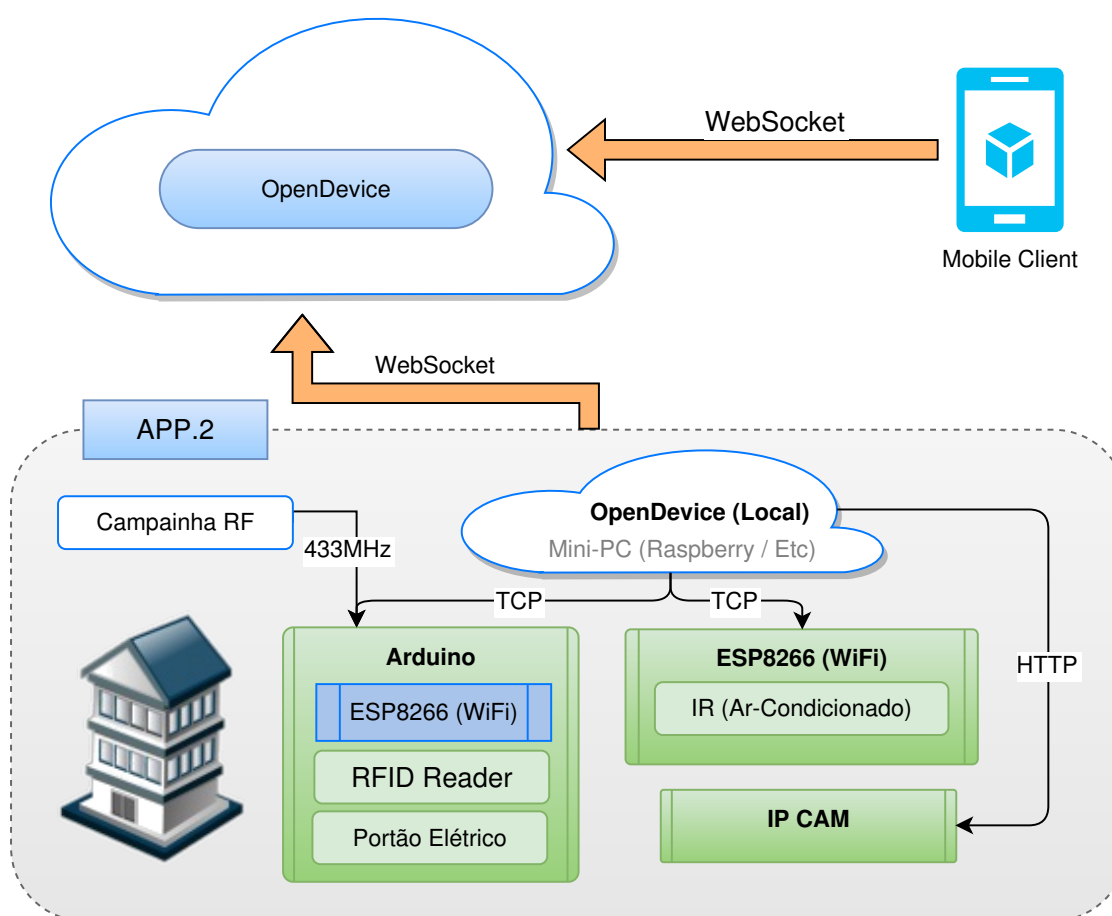
servidor (aplicação Java) não efetue a resposta até um tempo limite. É possível, também, a definição de chaves mestre, que não necessitam de autenticação “on-line”, permitindo a a liberação do acesso caso não exista conectividade com a Internet.

### 5.4.4 Cenário 2

O cenário 2, representado pela figura 5.8, pode ser considerado uma complementação do cenário 1, focado no controle de acesso, mas incluindo novos elementos de automação. Neste cenário é utilizado um servidor local, executando em um Raspberry Pi (ou BeagleBone), e o mesmo está sincronizado com o middleware na Internet.

O objetivo é avaliar o gerenciamento de vários dispositivos, a integração com uma câmera IP (que opera com protocolo próprio), a interface entre uma aplicação Mobile e dispositivos físicos pela Internet e a integração entre uma aplicação local e o middleware instalado em um servidor na nuvem.

Além do controle de acesso, usando RFID, este cenário integra uma campanha sem fio, operando na frequência 433Mhz, uma câmera IP (clone da Foscam) e um emissor de infra-vermelho para controle do ar-condicionado da sala de reunião.



**Figura 5.8** Diagrama - Cenário 2

### Descrição básica de funcionamento

Quando a campainha é pressionada, o receptor RF 433Mhz acoplado ao Arduino detecta o sinal e o firmware envia a notificação, via conexão Wi-Fi, para a aplicação (ou middleware), que está executando no servidor local. Em seguida, a aplicação captura a imagem da câmera IP e envia uma notificação para as aplicações mobile, informando que uma visita está aguardando a liberação, que pode ser realizada pelo próprio aplicativo Mobile.

### Estruturação do projeto:

Este cenário é composto por 5 aplicações/componentes, que serão detalhados a seguir:

- **Dispositivo 1 (Arduino):** Similar à implementação do cenário 1, com algumas modificações no hardware. Foi utilizado o Arduino UNO e a conectividade Wi-Fi é fornecida pelo módulo ESP8266, utilizando o firmware AT, conectado na porta UART do Arduino. Também foi incluído um módulo receptor RF 433 Mhz que recebe o sinal da campainha.
- **Dispositivo 2 (ESP8266):** O dispositivo que faz o controle do ar-condicionado. Opera no modo independente (standalone), ou seja, sem depender de outro componente. É programado com um firmware baseado no framework do Arduino[51], utilizando a biblioteca do OpenDevice e a biblioteca para operar o emissor de infra-vermelho<sup>6</sup>. A comunicação com a aplicação local, é feita usando o protocolo MQTT em conjunto com o protocolo do OpenDevice.
- **Middleware Local:** Aplicação que executa localmente no Raspberry Pi e responsável pelo gerenciamento de todos os dispositivos do projeto. É baseada na versão padrão do middleware, e as regras específicas para o projeto são implementadas através de extensões. As extensões incluídas neste cenário adicionaram novas entidades persistentes, novas interfaces Rest, suporte a novos dispositivos (câmera IP) e novas páginas na interface administrativa do middleware. O sistema de armazenamento utiliza a implementação padrão, baseada no Neo4J, com suporte a JPA (Java Persistence API). A aplicação local possui uma conexão com a versão do middleware que está implantado em um servidor na nuvem (Amazon), permitindo que aplicações clientes controlem os dispositivos pela Internet.
- **Middleware:** Implementação padrão disponibilizada pelo OpenDevice, o middleware foi implantado em um servidor na nuvem, permitindo a comunicação com dispositivos pela Internet, sem a necessidade de configurações de IP Fixo ou DDNS (Dynamic DNS).
- **Aplicação Mobile (Android):** Permite a visualização da imagem (posteriormente vídeo) capturada pela câmera, liberação da fechadura elétrica e controle do ar-condicionado da sala de reunião. A comunicação é realizada com o middleware local, caso o dispositivo mobile esteja conectado na mesma rede do middleware, ou com o middleware na Internet, caso esteja usando uma rede 3G/4G.

---

<sup>6</sup><https://github.com/markszabo/IRremoteESP8266>

### Integração com Câmeras IP

A câmera IP utilizada, utiliza um protocolo HTTP próprio. Para realizar a integração, foi criada uma nova extensão que implementa a abstração para este dispositivo. A extensão consiste basicamente na implementação de duas classes: *IPCamConnection* e *IPCamGenericProtocol*.

A classe *IPCamGenericProtocol*, implementa a interface *MessageSerializer*, é responsável por converter os comandos “*ActionCommand*” e “*SetPropertyCommand*”, em requisições HTTP, seguindo as especificações da câmera. O protocolo da câmera foi obtida através de engenharia reversa e está disponível no website do autor<sup>7</sup>.

## 5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma avaliação experimental, que abordou vários aspectos e componentes da arquitetura proposta. Os testes de performance, permitiram analisar a sobrecarga no tempo de comunicação com os dispositivos, introduzido pelos componentes da arquitetura. Bons resultados foram obtidos, principalmente na comunicação USB, mesmo sem a arquitetura ter passado por nenhum processo de otimização.

Os experimentos conduzidos na seção 5.3, permitiram avaliar positivamente, a possibilidade de integração com plataformas 3D, que podem ser usadas para criar ambientes de simulação.

Os experimentos realizados no estudo de caso (seção 5.4), permitiram avaliar um amplo conjunto de componentes da plataforma. O estudo de caso, cenário 1, permitiu avaliar a plataforma como framework e a facilidade de implementação de projetos simples. O Cenário 2, permitiu avaliar as capacidades de extensibilidade do middleware, integração com vários dispositivos, utilização de várias tecnologias de comunicação e hardwares. A integração com a câmera IP, apresentou um real desafio, pois ela opera usando um protocolo próprio e é um dispositivo relativamente complexo, pois possui controle de movimentação, infra-vermelho, controle de brilho, saturação, tira fotos (snapshot), vídeo e etc. Porém a integração foi bem sucedida, de modo que a câmera e suas propriedades são totalmente acessíveis também da camada JavaScript / Web.

---

<sup>7</sup>Protocolo câmera IP Foscam: <https://goo.gl/yDUjDI>

Estes experimentos demonstraram o potencial e flexibilidade da arquitetura proposta.

# 6

## Conclusões

A criação de projetos para Internet das Coisas lida com vários desafios, na sua essência, relacionados à heterogeneidade dos dispositivos, protocolos e tecnologias de comunicação. As arquiteturas baseadas em middleware têm sido apresentadas como potenciais soluções para lidar com estes desafios, conforme observamos no capítulo de trabalhos relacionados. Porém, devido à grande variedade de domínios que estão inseridos os projetos de IoT, dificilmente um único padrão de middleware genérico irá resolver adequadamente os desafios de todos os domínios.

Desta forma, este trabalho propõe uma solução baseada em framework, com uma infraestrutura sólida de comunicação, abstração de dispositivos e gerenciamento de armazenamento, permitindo o desenvolvimento de soluções específicas para cada domínio.

A implementação do middleware permitiu avaliar que o mesmo pode ser adotado em projetos menos complexos, mostrando-se uma alternativa eficaz para abstração de dispositivos e protocolos, simplificando o processo de desenvolvimento de soluções de IoT.

A disponibilização de bibliotecas que auxiliam na construção de aplicações embarcadas (firmware), permitem a simplificação do processo de desenvolvimento de dispositivos inteligentes, habilitados para Internet das Coisas. As ferramentas oferecidas neste trabalho, bem como o protocolo proposto, permitem a utilização de microcontroladores de baixo custo e plataformas de prototipação, como o Arduino, para criação destes dispositivos.

A disponibilização de bibliotecas para construção de aplicações cliente, que imple-



mentam o protocolo proposto, permitem a integração de aplicações usando linguagens de alto nível e simplificando o processo de desenvolvimento.

Os experimentos realizados na seção 5.3, permitiram avaliar a simplicidade da implementação do protocolo em outra linguagem de programação.

Por fim, a arquitetura proposta, seu design e implementação, conseguiram atender a todos objetivos estabelecidos no Capítulo 1, seção 1.2.

## 6.1 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Um framework para construção de projetos de Internet das Coisas, com uma estrutura flexível e modular, baseado em padrões abertos.
- Um framework de conexões, que permite a integração com novos servidores e a inclusão de novos protocolos de comunicação com os dispositivos.
- Um middleware genérico, multiplataforma e extensível, que permite a abstração da comunicação com dispositivos heterogêneos, utilizando tecnologias de comunicação USB, Bluetooth, Ethernet, Wi-Fi.
- Uma interface Web para visualização e análise de dados que permite a construção de dashboards dinâmicos, utilizando um série de gráficos com suporte a visualização de dados históricos ou em tempo real.
- Biblioteca JavaScript para criação de projetos Web, que realiza a abstração dos dispositivos e permite comunicação em tempo real utilizando WebSocket.
- Um componente que permite a execução de aplicações em JavaScript no lado do servidor ou como aplicações Desktop.
- Biblioteca para integração com dispositivos móveis (Android).
- Compilação e distribuição da biblioteca BlueCove (Bluetooth), para plataforma ARM.
- Experimentos com a API *Device I/O*, que validaram sua compatibilidade com a plataforma de desenvolvimento “Beaglebone Black”.

- Experimentos que oferecem os fundamentos para criação de sistemas de simulação usando ambientes 3D.
- A proposta de um protocolo aberto, simples, extensível e de fácil implementação, que permite a comunicação com dispositivos com baixo poder de processamento e memória.
- Um conjunto de bibliotecas (firmware) em C++ para microcontroladores e plataformas abertas (ex.: Arduino), que implementam o protocolo proposto e simplificam o processo de desenvolvimento de aplicações embarcadas.

## 6.2 Trabalhos Futuros

- Desenvolvimento de uma plataforma como serviço (PaaS), que ofereça uma infraestrutura escalável baseada em *cloud computing*, para desenvolvimento e implantação de projetos de IoT oferecidos como serviço (SaaS). Essa plataforma seria desenvolvida com base no OpenStack<sup>1</sup> e/ou OpenShift<sup>2</sup>.
- Criação de ferramentas para geração do firmware de forma automática usando linguagens declarativas ou visuais.
- Criação de ferramentas que permitam a atualização remota do firmware.
- Otimizar a estrutura de armazenamento de dados do Neo4J, utilizando um modelo baseado em árvore (GraphAware Neo4j TimeTree<sup>3</sup>). Este modelo pode oferecer uma melhor performance para trabalhar com consulta e análise de eventos baseados no tempo.
- Realizar estudos de caso em outros cenários, como casa inteligente, cidade inteligente, redes de sensores sem fio, etc.
- Implementação de algoritmos inteligentes para detecção de eventos complexos, usando *Complex Event Processing*.

---

<sup>1</sup><https://www.openstack.org/>

<sup>2</sup>[www.openshift.com](http://www.openshift.com)

<sup>3</sup><http://graphaware.com/neo4j/2014/08/20/graphaware-neo4j-timetree.html>

---

# Referências

- [1] Kevin Ashton. That 'internet of things' thing. *RFID Journal*, 22(7):97–114, 2009.
- [2] Simona Jankowski, James Covello, Heather Bellini, Joe Ritchie, and Daniela Costa. The internet of things: Making sense of the next mega-trend. *Goldman Sachs*, 2014.
- [3] Friedemann Mattern and Christian Floerkemeier. 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, 2010.
- [4] Thiago Teixeira, Sara Hachem, Valérie Issarny, and Nikolaos Georgantas. Service oriented middleware for the internet of things: a perspective. In *Towards a Service-Based Internet*, pages 220–229. Springer, 2011.
- [5] De-Li Yang, Feng Liu, and Yi-Duo Liang. A survey of the internet of things. In *Proceedings of the 1st International Conference on E-Business Intelligence (ICEBI2010)*,. Atlantis Press, 2010.
- [6] Artem Katasonov, Olena Kaykova, Oleksiy Khriyenko, Sergiy Nikitin, and Vagan Y Terziyan. Smart semantic middleware for the internet of things.
- [7] Soma Bandyopadhyay, Munmun Sengupta, Souvik Maiti, and Subhajit Dutta. Role of middleware for internet of things: A study. *International Journal of Computer Science and Engineering Survey*, 2(3), 2011.
- [8] Arduino.cc. What is arduino? <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Acesso em dez. 2015.
- [9] Raspberry Pi. Website. <https://www.raspberrypi.org>. Acesso em jan. 2016.
- [10] Espressif Systems. The esp8266. <http://espressif.com/en/products/esp8266/>. Acesso em jan. 2016.
- [11] Arduino.cc. Unofficial list of 3rd party boards support urls. <https://github.com/arduino/Arduino/wiki/Unofficial-list-of-3rd-party-boards-support-urls>. Acesso em dez. 2015.

- [12] Wikipedia.org. List of arduino boards and compatible systems. [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Arduino\\_boards\\_and\\_compatible\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Arduino_boards_and_compatible_systems). Acesso em dez. 2015.
  - [13] Arduino.cc. Arduino and arduino-compatible hardware. <http://playground.arduino.cc/Main/SimilarBoards>. Acesso em dez. 2015.
  - [14] Vinicius Santos. A internet das coisas e a tar: onde está o homem? <http://periodicos.ufpb.br/index.php/tematica/article/download/21420/11827>, 2014. Acesso em jan. 2016.
  - [15] COMPUTERWORLD. Internet das coisas: o cenário atual e o que esperar do futuro digital. <http://goo.gl/uSlVCm>. Acesso em jan. 2016.
  - [16] WebIntel by Ironpaper. Internet of things market statistics - 2015 - iot stats. <http://www.ironpaper.com/webintel/articles/internet-things-market-statistics-2015/>. Acesso em jan. 2016.
  - [17] Cisco. How service providers can help businesses to realize the promise of the iot revolution. <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/service-provider/mobile-internet/iotwf-whitepaper-realize-promise-iot-revolution.pdf>. Acesso em jan. 2016.
  - [18] Ronak Sutaria and Raghunath Govindachari. Understanding the internet of things. <http://electronicdesign.com/iot/understanding-internet-things>. Acesso em jan. 2016.
  - [19] Simona Jankowski, James Covello, Heather Bellini, Joe Ritchie, and Daniela Costa. The internet of things: Making sense of the next mega-trend. *Goldman Sachs*, 2014.
  - [20] T. Noergaard. *Embedded Systems Architecture: A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers*. Electronics & Electrical. Elsevier/Newnes, 2005.
  - [21] Tarun Agarwal. A brief about embedded system their classifications and applications. <https://www.efxkits.us/classification-of-embedded-systems>. Acesso em jan. 2016.
-

- [22] P. Chou, R. Ortega, and G. Borriello. Synthesis of the hardware/software interface in microcontroller-based systems. In *Computer-Aided Design, 1992. ICCAD-92. Digest of Technical Papers., 1992 IEEE/ACM International Conference on*, pages 488–495, Nov 1992.
- [23] D. Gadre. *Programming and Customizing the AVR Microcontroller*. McGraw-Hill Education, 2000.
- [24] Milan Verle. *PIC Microcontrollers*. McGraw-Hill Education, mikroElektronika.
- [25] Oracle. Java website - about. <https://www.java.com/en/about/>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [26] M. Evans, J. Noble, and J. Hochenbaum. *Arduino in Action*. Running Series. Manning, 2013.
- [27] S. Barrett. *Arduino Microcontroller: Processing for Everyone! Second Edition*. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems. Morgan & Claypool Publishers, 2012.
- [28] Wiring. Website. <http://Wiring.org.co>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [29] Processing. Website. <http://www.processing.org>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [30] Arduino.cc. Arduino/genuino uno board anatomy. <https://www.arduino.cc/en/Guide/BoardAnatomy>. Acesso em dez. 2015.
- [31] Arduino.cc. Código fonte da ide do arduino. <https://github.com/arduino/Arduino>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [32] Arduino.cc. Arduino - reference. <https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [33] elinux.org. Rpi distributions. [http://elinux.org/RPi\\_Distributions](http://elinux.org/RPi_Distributions), 2016. Acesso em jan. 2016.
- [34] Microsoft. Windows 10 iot core. <http://ms-iot.github.io/content/en-US/Downloads.htm>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [35] Lucasbosch. Raspberry pi b+ image. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Raspberry\\_Pi\\_B%2B\\_top.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Raspberry_Pi_B%2B_top.jpg). Acesso em jan. 2016.

- [36] elinux.org. Raspberry pi programming. [http://elinux.org/Raspberry\\_Pi\\_Programming](http://elinux.org/Raspberry_Pi_Programming), 2016. Acesso em jan. 2016.
- [37] Raspbian. Website. <https://www.raspbian.org/>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [38] Oracle. Using a raspberry pi to deploy javafx applications. <http://www.oracle.com/webfolder/technetwork/tutorials/obe/java/RaspberryPiFX/raspberryfx.html#section4>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [39] OpenJDK. Device i/o wiki. <https://wiki.openjdk.java.net/display/dio/Main>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [40] Pi4J. Website. <http://pi4j.com/>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [41] BeagleBone Foundation. Website. <http://beagleboard.org/>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [42] BeagleBone Foundation. Beaglebone black image. <http://beagleboard.org/media>. Acesso em jan. 2016.
- [43] Bulldog. Website. <https://github.com/Datenheld/Bulldog>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [44] Espressif Systems. *ESP8266EX Datasheet*, June 2015. Version 4.3.
- [45] Cadence. Xtensa customizable processors. [http://ip.cadence.com/ipportfolio/tensilica-ip/xtensa-customizable?CMP=pr012815\\_Espressif](http://ip.cadence.com/ipportfolio/tensilica-ip/xtensa-customizable?CMP=pr012815_Espressif), 2016. Acesso em jan. 2016.
- [46] Esp8266.com. Esp8266 wiki - modules. <http://www.esp8266.com/wiki/doku.php?id=esp8266-module-family>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [47] Epressif. Esp8266 sdk. <https://github.com/esp8266/esp8266-wiki/tree/master/sdk>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [48] Epressif. Esp8266 github. <https://github.com/espressif>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [49] NodeMCU. Website. <http://nodemcu.com/>, 2016. Acesso em jan. 2016.

- [50] Espruino. Website. <https://github.com/espruino/Espruino>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [51] ESP8266 Community. Esp8266 core for arduin. <https://github.com/esp8266/Arduino>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [52] Jason Lester Hill. *System architecture for wireless sensor networks*. PhD thesis, University of California, Berkeley, 2003.
- [53] Håkon Kløvstad Olafsen. *Wireless sensor network localisation strategies*. 2007.
- [54] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422, 2002.
- [55] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *System sciences, 2000. Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on*, pages 10–pp. IEEE, 2000.
- [56] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 56–67. ACM, 2000.
- [57] Mark Perillo and Wendi B Heinzelman. Providing application qos through intelligent sensor management. In *Sensor Network Protocols and Applications, 2003. Proceedings of the First IEEE. 2003 IEEE International Workshop on*, pages 93–101. IEEE, 2003.
- [58] Mark A Perillo and Wendi B Heinzelman. Optimal sensor management under energy and reliability constraints. In *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, volume 3, pages 1621–1626. IEEE, 2003.
- [59] Thomas Luckenbach, Peter Guber, Stefan Arbanowski, Andreas Kotsopoulos, and Kyle Kim. Tinyrest - a protocol for integrating sensor networks into the internet. In *Proc. of REALWSN*, 2005.
- [60] Miriam Christi Midori Oishi Nemoto, Eduardo Pinheiro Gondim de Vasconcellos, and Michitoshi Oishi. Implementation of radio frequency identification technology in multinational companies: a brazilian case study. *International Journal of Management*, 29(4):554, 2012.

- [61] Radio frequency identification (rfid). *Computers & Security*, 25(1):18 – 26, 2006.
- [62] V. Chawla and Dong Sam Ha. An overview of passive rfid. *Communications Magazine, IEEE*, 45(9):11–17, September 2007.
- [63] Xiaowei Zhu, Samar K Mukhopadhyay, and Hisashi Kurata. A review of rfid technology and its managerial applications in different industries. *Journal of Engineering and Technology Management*, 29(1):152–167, 2012.
- [64] Dr. Peter Harrop Raghu Das. Players & opportunities 2007-2017. Technical report, RFID Forecasts, 2007. Acesso em jan. 2016.
- [65] Benjamin Khoo. Rfid - from tracking to the internet of things: A review of developments. In *Proceedings of the 2010 IEEE/ACM Int’L Conference on Green Computing and Communications & Int’L Conference on Cyber, Physical and Social Computing*, GREENCOM-CPSCOM ’10, pages 533–538, Washington, DC, USA, 2010. IEEE Computer Society.
- [66] Long Ngo. Service-oriented architecture for home networks. In *Seminar on Internetworking*, pages 1–6, 2007.
- [67] ZigBee Alliance. Zigbee home automation public application profile. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2007.
- [68] Soyoung Hwang and Donghui Yu. Remote monitoring and controlling system based on zigbee networks. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 6(3):35–42, 2012.
- [69] Carles Gomez and Josep Paradells. Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies. *IEEE Communications Magazine*, 48(6):92–101, 2010.
- [70] Zigbee Alliance. Smart energy profile specification, version1. 0.
- [71] Bluetooth™. In specification of the bluetooth system. IEEE: Piscataway, New Jersey, 2004.
- [72] Jaap Haartsen, Mahmoud Naghshineh, Jon Inouye, Olaf J. Joeressen, and Warren Allen. Bluetooth: Vision, goals, and architecture. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 2(4):38–45, October 1998.



- [73] Bluetooth SIG (Special Interest Group). *Bluetooth Core Specification*. The organization, 1 edition, December 1999. Core v1.0 B.
- [74] Bluetooth SIG. Bluetooth core specification. <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>. Acesso em jan. 2016.
- [75] SIG Bluetooth. Bluetooth core specification version 4.0. *Specification of the Bluetooth System*, 2010.
- [76] SIG Bluetooth. Bluetooth core specification. <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/core-specification.aspx>, 2010. Acesso em jan. 2016.
- [77] JFR. *Z-Wave Protocol Overview*. Zensys A/S, 2006. Version 2.
- [78] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee et al. Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications, 1997.
- [79] R.G. Garroppo, L. Gazzarrini, S. Giordano, and L. Tavanti. Experimental assesment of the coexistence of wi-fi, zigbee, and bluetooth devices. In *World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), 2011 IEEE International Symposium on a*, pages 1–9, June 2011.
- [80] Rick Merritt. Wifi rides 900 mhz, attacking zigbee. [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1319364](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1319364), 2013. Acesso em jan. 2016.
- [81] S. Aust, R.V. Prasad, and I.G.M.M. Niemegeers. Ieee 802.11ah: Advantages in standards and further challenges for sub 1 ghz wi-fi. In *Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on*, pages 6885–6889, June.
- [82] Z. Shelby and C. Bormann. *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. Wiley, 2009.
- [83] Andreas F Molisch, Kannan Balakrishnan, Dajana Cassioli, Chia-Chin Chong, Shahriar Emami, Andrew Fort, Johan Karedal, Juergen Kunisch, Hans Schantz, Ulrich Schuster, et al. Ieee 802.15. 4a channel model-final report. *IEEE P802*, 15(04):0662, 2004.
- [84] Jonathan W Hui. The routing protocol for low-power and lossy networks (rpl) option for carrying rpl information in data-plane datagrams. 2012.

- [85] Leopoldo Angrisani, Matteo Bertocco, Daniele Fortin, and Alessandro Sona. Experimental study of coexistence issues between ieee 802.11 b and ieee 802.15.4 wireless networks. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 57(8):1514–1523, 2008.
- [86] Roy Thomas Fielding. *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. PhD thesis, University of California, Irvine, 2000.
- [87] M. Tim Jones. Entenda o representational state transfer (rest) no ruby. <http://www.ibm.com/developerworks/br/library/os-understand-rest-ruby/>, 2012. Acesso em jan. 2016.
- [88] Vanessa Wang, Frank Salim, and Peter Moskovits. *The definitive guide to HTML5 WebSocket*, volume 1. Springer, 2013.
- [89] Ian Fette and Alexey Melnikov. The websocket protocol. 2011.
- [90] Zach Shelby, Klaus Hartke, and Carsten Bormann. The constrained application protocol (coap). 2014.
- [91] IETF. Constrained restful environments. <https://datatracker.ietf.org/doc/charter-ietf-core/>, 2016. Acesso em jan. 2016.
- [92] Zach SHELBY. Coap: the web of things protocol. <http://pt.slideshare.net/zdshelby/coap-tutorial>. Acesso em jan. 2016.
- [93] OASIS. Mqtt version 3.1.1 becomes an oasis standard. <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>, 2014. Acesso em jan. 2016.
- [94] OASIS. Mqtt version 3.1.1. <https://www.oasis-open.org/news/announcements/mqtt-version-3-1-1-becomes-an-oasis-standard>, 2014. Acesso em jan. 2016.
- [95] Oracle. Figure 2–3 simple publish/subscribe messaging. <https://docs.oracle.com/cd/E19587-01/821-0028/6nl41ccqd/index.html>, 2010. Acesso em jan. 2016.

- [96] Peter R. Egli. Mqtt - mq telemetry transport for message queueing. <http://www.slideshare.net/PeterREgli/mq-telemetry-transport/9>. Acesso em jan. 2016.
- [97] Qusay H Mahmoud. *Middleware for communications*. Wiley Online Library, 2004.
- [98] Hans van der Veer and Anthony Wiles. Achieving technical interoperability. *European Telecommunications Standards Institute*, 2008.
- [99] A. Brown H. Haas, W3c working group and Microsoft. W3c - web services glossary. <http://www.w3.org/TR/2004/NOTE-ws-gloss-20040211/>, 2004. Acesso em jan. 2016.
- [100] Dan Driscoll, Antoine Mensch, Toby Nixon, and Alain Regnier. Devices profile for web services version 1.1. *OASIS Standard*, July, 1:4, 2009.
- [101] Bill Schilit, Norman Adams, and Roy Want. Context-aware computing applications. In *Mobile Computing Systems and Applications, 1994. WMCSA 1994. First Workshop on*, pages 85–90. IEEE, 1994.
- [102] Manfred Hauswirth and Karl Aberer. Middleware support for the "internet of things". 2006.
- [103] Luis Roalter, Matthias Kranz, and Andreas Möller. A middleware for intelligent environments and the internet of things. In *Ubiquitous Intelligence and Computing*, pages 267–281. Springer, 2010.
- [104] Jaeho Kim and Jang-Won Lee. Openiot: An open service framework for the internet of things. In *Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on*, pages 89–93. IEEE, 2014.
- [105] Eclipse IoT. Website. <http://iot.eclipse.org>. Acesso em jan. 2016.
- [106] Jorg Swetina, Guang Lu, Patricia Jacobs, Francois Ennesser, and JAESEUNG Song. Toward a standardized common m2m service layer platform: Introduction to onem2m. *Wireless Communications, IEEE*, 21(3):20–26, 2014.
- [107] Eclipse IoT. Projects. <http://iot.eclipse.org/projects>. Acesso em jan. 2016.

- [108] BUTLER. Website. <http://www.iot-butler.eu>. Acesso em jan. 2016.
- [109] Selected technologies for the BUTLER platform. Technical report, BUTLER, 2013. Acesso em jan. 2016.
- [110] Martin Sarnovsky, Peter Butka, Peter Kostelnik, and Dasa Lackova. Hydra - network embedded system middleware for ambient intelligent devices. In *ICCC'2007: Proceedings of 8th Inter-national Carpathian Control Conference*, 2007.
- [111] Marco Jahn, Marc Jentsch, Christian R Prause, Ferry Pramudianto, Amro Al-Akkad, and Rene Reiners. The energy aware smart home. In *Future Information Technology (FutureTech), 2010 5th International Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [112] Samuel R Madden, Michael J Franklin, Joseph M Hellerstein, and Wei Hong. Tinydb: an acquisitional query processing system for sensor networks. *ACM Transactions on database systems (TODS)*, 30(1):122–173, 2005.
- [113] IoT@Work. Website. <https://www.iot-at-work.eu>. Acesso em jan. 2016.
- [114] D Rotondi et al. Project deliverable d1. 1-state of the art and functional requirements in manufacturing and automation. *EU FP7 IoT@ Work, public project deliverable, Dec*, 2011.
- [115] Oracle. Internet of things - oracle cloud. <https://cloud.oracle.com/iot>. Acesso em jan. 2016.
- [116] Salesforce. Internet of things (iot) platform & software. <http://www.salesforce.com/iot-cloud/>. Acesso em jan. 2016.
- [117] IBM. Ibm watson internet of things platform (iot). <http://www.ibm.com/internet-of-things/>. Acesso em jan. 2016.
- [118] Amazon. Aws iot. <https://aws.amazon.com/pt/iot/>. Acesso em jan. 2016.
- [119] Arduino.cc. Microsoft and arduino: New partnership announced today. <https://blog.arduino.cc/2015/04/30/>

- [microsoft-and-arduino-new-partnership](#). Acesso em jan. 2016.
- [120] Microsoft. Pacote do azure iot - microsoft azure. <https://azure.microsoft.com/pt-br/solutions/iot-suite/>. Acesso em jan. 2016.
- [121] Intel. The intel® iot platform: Secure, scalable, interoperable. <http://www.intel.com/content/www/us/en/internet-of-things/iot-platform.html>. Acesso em jan. 2016.
- [122] Inc LogMeIn. Xively website. <https://xively.com/>. Acesso em jan. 2016.
- [123] OSGi Alliance. Architecture. <https://www.osgi.org/developer/architecture/>. Acesso em dez. 2015.
- [124] Linux Kernel Organization. Gpio sysfs interface for userspace. <https://www.kernel.org/doc/Documentation/gpio/sysfs.txt>. Acesso em dez. 2015.
- [125] Felber P. A. Guerraoui R. and Kermarrec A.-M. Eugster, P. T. The many faces of publish/subscribe. *ACM Comput. Surv.*, 35(2):114 – 131, 2003.
- [126] Olivier Maquelin, Guang R. Gao, Herbert H. J. Hum, Kevin B. Theobald, and Xin-Min Tian. Polling watchdog: Combining polling and interrupts for efficient message handling. In *Proceedings of the 23rd Annual International Symposium on Computer Architecture*, ISCA '96, pages 179–188, New York, NY, USA, 1996. ACM.
- [127] RFC-Base.org. Dns-based service discovery. <http://www.rfc-base.org/rfc-6763.html>. Acesso em dez. 2015.
- [128] JCP. Jsr 80: Java usb api. <https://jcp.org/en/jsr/detail?id=80>. Acesso em dez. 2015.
- [129] JCP. Jsr 82: Java apis for bluetooth. <https://jcp.org/ja/jsr/detail?id=82>. Acesso em dez. 2015.
- [130] Internet Engineering Task Force (IETF). The websocket protocol. <https://tools.ietf.org/html/rfc6455>. Acesso em dez. 2015.
-

- [131] World Wide Web Consortium (W3C). The websocket api. <http://dev.w3.org/html5/websockets/>. Acesso em dez. 2015.
- [132] JCP. Jsr 356: Java api for websocket. <https://jcp.org/en/jsr/detail?id=356>. Acesso em dez. 2015.
- [133] Schwager M. Pin change interrupt timing. <https://github.com/GreyGnome/EnableInterrupt/blob/master/Interrupt%20Timing.pdf>. Acesso em dez. 2015.
- [134] Barton P. Miller Victor C. Zandy. Reliable network connections. [ftp://ftp.cs.wisc.edu/pub/paradyn/technical\\_papers/rocks.pdf](ftp://ftp.cs.wisc.edu/pub/paradyn/technical_papers/rocks.pdf). Acesso em dez. 2015.
- [135] Arduino.cc. A custom version of openwrt, targeted to the arduino yún. <https://github.com/arduino/openwrt-yun>. Acesso em dez. 2015.
- [136] NXP. Mfrc522 standard 3v mifare reader solution data sheet. [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/MFRC522.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/MFRC522.pdf). Acesso em dez. 2015.
- [137] Grusin M. Serial peripheral interface (spi). <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi>. Acesso em dez. 2015.
- [138] Texas Instruments. Keystone architecture serial peripheral interface (spi) user guide. <http://www.ti.com/lit/ug/sprugp2a/sprugp2a.pdf>. Acesso em dez. 2015.
- [139] O’Leary M. A client library for the arduino ethernet shield that provides support for mqtt. <https://github.com/knolleary/pubsubclient>. Acesso em dez. 2015.
- [140] Balboa M. Arduino rfid library for mfrc522. <https://github.com/miguelbalboa/rfid>. Acesso em dez. 2015.
- [141] Koteck J. Mapdb: Database engine. <http://www.mapdb.org/>. Acesso em dez. 2015.

# **Apêndice**

# Exemplo de Aplicação em JavaFX + JS

```
var Button = javafx.scene.control.Button;
var HBox = javafx.scene.layout.HBox;
var Scene = javafx.scene.Scene;

var led = new Device(1, DIGITAL);

stage.title = "OpenDevice";

var btnConnect = new Button("Connect");
btnConnect.onAction = function() connect(usb());
// connect(bluetooth("00:13:03:14:19:07"));

var button = new Button("On/Off");
button.onAction = function() led.toggle();
button.setDisable(true);

var root = new HBox();
root.children.addAll(btnConnect, button);
stage.scene = new Scene(root);
stage.show();

onConnected(function() {
    button.setDisable(false);
});

onConnected(function() {
    button.setDisable(false);
});
```