

Paradigma de redes definidas por software aplicado a redes de sensores sem fio e Internet das Coisas

Profa. Dra. Cíntia Borges Margi
cintia@usp.br

Laboratório de Arquitetura e Redes de Computadores (LARC)
Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS)
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP)



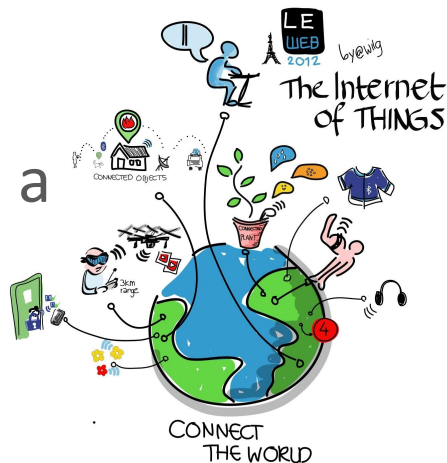
Tópicos abordados

- Introdução
 - Definições e Motivação
 - Aplicações
- Tecnologias viabilizadoras
 - Hardware
 - Sistemas operacionais
 - Comunicação: visão geral
- Software-defined networking aplicado a RSSF e IoT
 - Visão geral
 - IT-SDN

Introdução

Internet of Things (IoT)

- Ou Internet das Coisas.
- Diversos objetos físicos são conectados em rede e acessíveis a partir da Web/Internet
 - sensores, atuadores, dispositivos com tags RFID, telefones, veículos, prédios, ...
- Estes objetos podem medir, processar e comunicar.



Termo Internet of Things

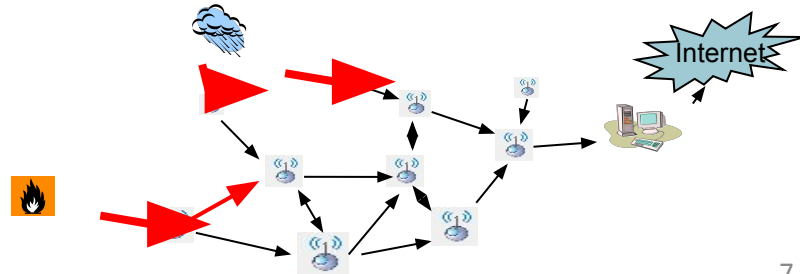
- Kevin Ashton cunhou o termo IoT em 1999, no contexto de RFID.
- Conceito previsto na início da década de 90 → Physical Web (WANT; SCHILIT; JENSON, 2015).
- Ao longo do tempo, muda contexto de modo a considerar outras tecnologias de comunicação.
- IoT considerada tecnologia emergente em 2012, conforme Gartner Group.

Definições de IoT

- IEEE IoT Initiative
 - <https://iot.ieee.org/>
- Wikipedia
 - https://pt.wikipedia.org/wiki/Internet_das_coisas
- Oracle
 - <https://www.oracle.com/br/internet-of-things/what-is-iot/>
 - Um ponto interessante aqui, é a definição de **Industrial IoT**
- Intel: *Internet of Things - Accelerating the IoT with Intel® FPGAs and SoCs.*
 - <https://www.intel.com/content/www/us/en/internet-of-things/products/programmable/overview.html>

O que são Redes de Sensor sem fio?

- RSSF são redes de dispositivos com capacidade de “sentir” (sense) o ambiente, executar processamento local (on-board) e se comunicar.
- Aplicações:
 - Possibilita monitoramento ambiental em alta densidade no espaço e no tempo.
 - Podem ser colocados dentro do fenômeno a ser analisado ou próximo a ele, diferentemente dos sensores tradicionais



IoT e RSSF (ou WSN)

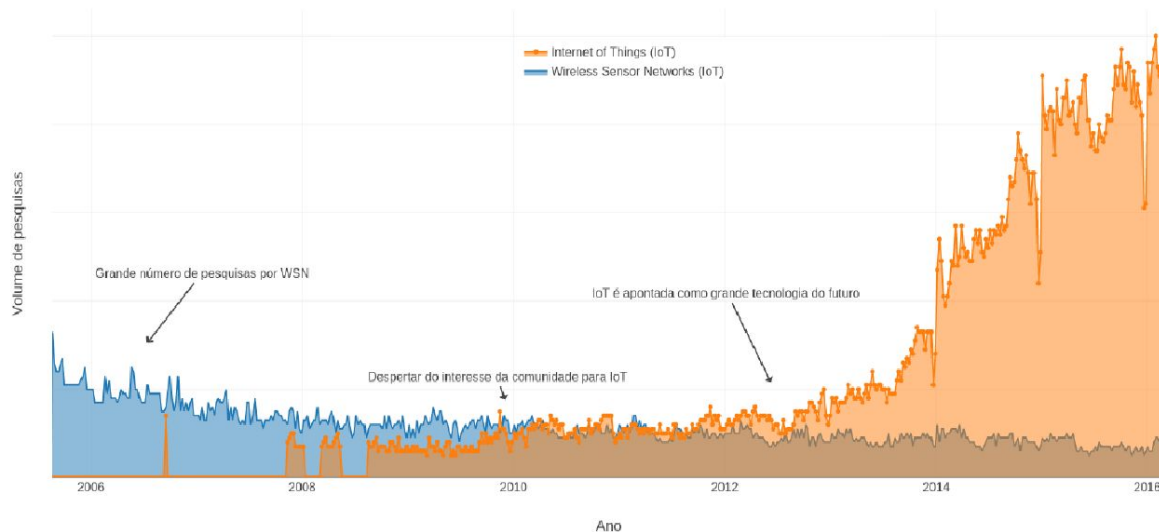


Figura 1.1. Volume de pesquisas no Google sobre *Wireless Sensor Networks* e *Internet of Things*

Fonte: Santos *et al.*, Internet das Coisas: da teoria à prática. Minicurso SBRC 2016.

Aplicações

Overview

Benefits

Applications



Smart City Infrastructure

At the heart of many Smart City applications are "intelligent vision" systems for environmental and weather monitoring, parking management, retail analytics and enhanced public safety. Intel® FPGA SoCs enable high-performance and real-time video analytics for these applications.

[Learn more](#)



Industry 4.0

Industry 4.0, or the fourth wave of the Industrial Revolution, leverages connectivity and autonomous operation to create robust industrial IoT applications. Our PLC solutions integrate M2M and secure enterprise application interoperability over cloud with OPC-UA, to deliver clear cost, power and TTM benefits for factory automation systems.

[Learn more](#)



Smart Grid

We provide scalable, high-performance solutions to meet the requirements of today's mission-critical Smart Grid functions, such as control loop, grid communications, network redundancy and security.

[Learn more](#)



Healthcare systems

Healthcare systems can leverage IoT to enable fast and accurate aggregation of patient vital signs and other data from networked devices. These applications promise improved diagnostics and elimination of manual processes. FPGAs have the computing power to manage medical data aggregation, enabling improved patient care.

[Learn more](#)



Connected Car

Connected Car applications, commonly called V2X (Vehicle-to-Anything), are seen as the next step for the autonomous vehicle to enable further improvements in safety and fuel efficiency. Intel® FPGAs are ideally suited for optimization and acceleration of evolving V2X communication encryption algorithms.

[Learn more](#)



Data Center

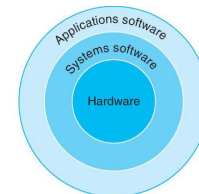
The data center is central to the IoT as it processes data from millions of devices and sensors for highly optimized autonomous operation. Today, Intel® FPGAs are being used to improve throughput, response time and energy efficiency through the offloading of compute workloads from the server's central processing units (CPUs) onto FPGAs.

[Learn more](#)

Fonte: <https://www.intel.com/content/www/us/en/internet-of-things/products/programmable/overview.html>

Tecnologias viabilizadoras

Hierarquia hardware/software



Copyright © 2009 Elsevier, Inc.

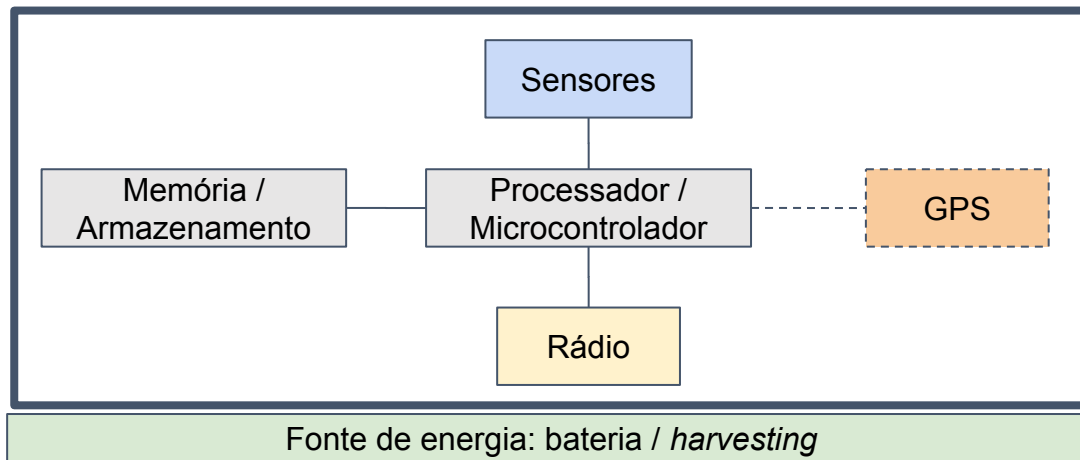
- Software de Aplicações
 - escrito em linguagem de alto nível (HLL)
- Sistema de software
 - Compilador: traduz código em HLL para linguagem de máquina
 - SO: código de serviço
 - lidar com E/S
 - gerenciamento de memória e armazenamento
 - agendamento de tarefas e compartilhamento de recursos
- Hardware
 - Processador, memória, controlador de E/S

Tecnologia

- Microeletrônica e “Lei de Moore”
 - Integração de circuitos:
 - Capacidade de integrar mais funções em um único chip.
- Comunicação sem fio
- Novos sensores

Hardware básico

- Capacidade de: sensoriamento, processamento e comunicação
- Restrições de recursos



Exemplos de hardware

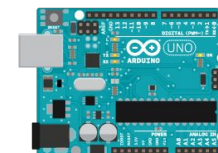


Fonte: Texas Instrument

Table 1

Architecture comparison.

Class	Name	Device Architecture	Energy (mW)	
			Idle	Processing
SBC	Intel Edison	Atom (x86@500 MHz dual-core)	88	340
	Intel Galileo	Quark (x86@400 MHz)	520	550
	BeagleBone Black	Cortex-A8 (ARM@1 GHz)	310	400
	Raspberry Pi A	Broadcom (ARM@700 MHz)	130	180
	Raspberry Pi B	Broadcom (ARM@700 MHz)	380	410
WSN	MICAz	ATmega128L (RISC@7.3 MHz)	26	0.025
	TelosB	TI MSP430 (RISC@8 MHz)	4.8	0.035
	Arduino Yun	ATmega32U4 (RISC@16 MHz) + Atheros (MIPS@400 MHz)	240	280



Fonte: arduino.cc



Fonte: Geovandro C. C. F. Pereira, Renan C. A. Alves, Felipe L. da Silva, Roberto M. Azevedo, Bruno C. Albertini, Cíntia B. Margi, "Performance Evaluation of Cryptographic Algorithms over IoT Platforms and Operating Systems", Security and Communication Networks, vol. 2017, Article ID 2046735, 16 pages, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2046735>

Sistemas Operacionais

- Funções básicas:
 - definição da interface com o usuário
 - compartilhamento de hardware entre usuários
 - compartilhamento de dados entre usuários
 - gerenciamento dos dispositivos de entrada e saída
 - tratamento e recuperação de erros
- O que muda para um sistema embarcado?

SO embarcado

- Quais características?
 - Tempo real
 - Baixo consumo
 - Baixa complexidade
 - *Footprint* pequeno
 - Uso de memória pequeno
- Aplicação específica!

Exemplo: Contiki

- Contiki
 - Microkernel monolítico de baixo footprint: 25 KB RAM + 30 KB ROM
 - Pilha uIP (TCP/IPv4 e IPv6)
 - ContikiMAC (*low power radio management*)
 - Possui simulador/emulador: Cooja
- Substituído pelo Contiki-NG
 - <https://www.contiki-ng.org/>
 - Removeu protocolos e aplicações acumuladas ao longo de 20 anos
 - Foco na pilha de protocolos IETF

Exemplo: SO de tempo real

- RIOT (<https://riot-os.org/>)
 - 2008: FU Berlin, INRIA e HAW Hamburg
 - Microkernel: Multithread e RTOS; 8, 16 e 32 bits; POSIX Compliant
 - Roda como processo em hospedeiros
 - Rede voltada para IoT: IPv6, 6LoWPAN, RPL, UDP e CoAP
- FreeRTOS (<https://www.freertos.org/>)
 - 2003: Real Time Engineers Ltd.
 - Microkernel: Footprint baixo: 5-10 KB; Tickless (opc.); **100% determinístico**; Multithread / Coroutine
 - Rede: Full-stack (TCP/IP) ou uIP

O que são Redes sem fio?

- Redes: substantivo feminino. 16. sistema constituído pela interligação de dois ou mais computadores e seus periféricos, com o objetivo de comunicação, compartilhamento e intercâmbio de dados.
- Sem: preposição. 1. relaciona por subordinação e indica: 1.1. ausência, privação, falta.
- Fio: substantivo masculino. 19. ligação ou circuito de comunicação.

Reviendo o Modelo Internet

- **Aplicação:** suporta as aplicações de rede. Ex.: FTP, SMTP, HTTP
- **Transporte:** transferência de dados fim-a-fim. Ex.: TCP, UDP
- **Rede:** encaminhamento de datagramas da origem ao destino, determinação de rotas. Ex.: IP, protocolos de roteamento
- **Enlace:** transferência de dados entre elementos vizinhos da rede. Ex.: PPP, Ethernet, IEEE 802.11
- **Física:** bits “nos fios dos canais”

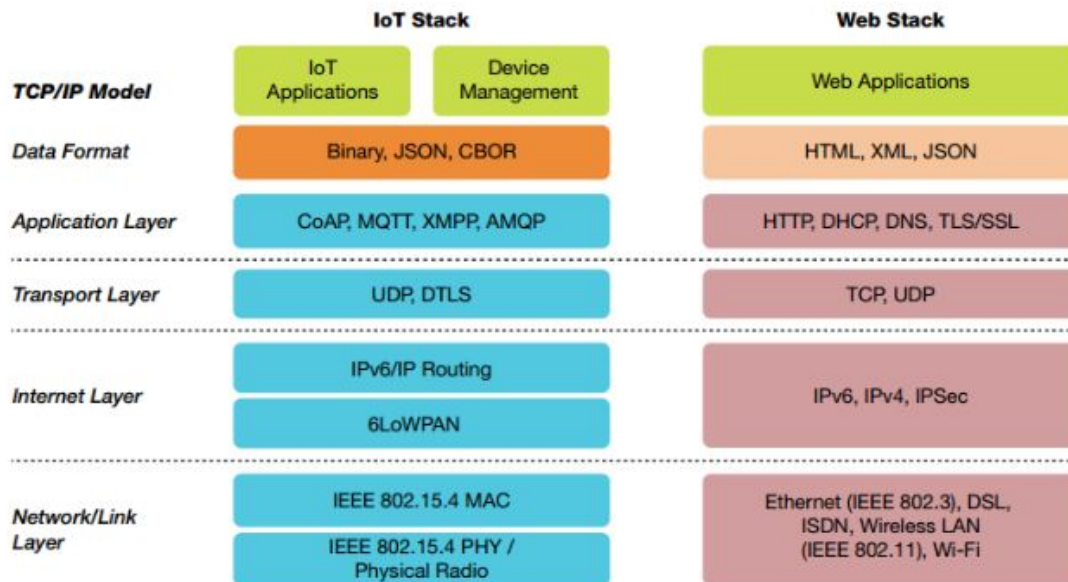
Qual impacto em redes sem fio?

- **Aplicação:** independe do meio de comunicação
- **Transporte:** pode ter problemas de desempenho dependendo do meio
- **Rede:** desempenho apropriado depende do meio
- **Enlace:** protocolos específicos, padronizados pelo IEEE
- **Física:** codificação e padrões específicos, padronizados pelo IEEE em conjunto com acesso ao meio

Exemplos de padrões IEEE

- IEEE 802.20 WMAN 3GPP (GSM)
- IEEE 802.16 WirelessMAN
- IEEE 802.11 WirelessLAN
- IEEE 802.15 WirelessPAN
 - Bluetooth, UWB, “ZigBee”

Pilha de Protocolos IoT



Fonte: <https://www.linkedin.com/pulse/emerging-open-standard-protocol-stack-iot-aniruddha-chakrabarti>

Grupos de trabalho do IETF

- 6LoWPAN (out/2004 - jan/2014)
 - RFC 4944: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4
 - Definições, casos de uso, requisitos de roteamento, protocolo de descoberta de vizinhos, compressão do cabeçalho IPv6
- 6lo (out/2013 - atual)
 - IPv6 para redes com recursos limitados
 - Camadas de adaptação para várias tecnologias de enlace
 - Gerenciamento (definição de MIB)
- ROLL (fev/2008 - atual)
 - RFC 6550: RPL - IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks
 - especificação de roteamento para redes de baixo consumo de energia e com perdas, provendo mecanismos para tráfego multiponto-ponto, ponto-multiponto e ponto-a-ponto
- CoRE (mar/2010 - atual)
 - Framework para aplicações orientadas a recurso que serão executadas em redes IP com restrição de recursos
 - RFC 7252: The Constrained Application Protocol (CoAP) - 2014

6lowpan

- É uma camada de adaptação que permite o transporte de pacotes IPv6 sobre enlaces padrão IEEE 802.15.4
- Fragmentação / remontagem de pacotes IPv6
- Compressão de cabeçalhos IPv6 e UDP/ICMP
- Baixo processamento e baixa alocação de memória e armazenamento
- Especificado na RFC 4944 com base na norma IEEE 802.15.4-2003
- Usa enlace IEEE 802.15.4 no modo CSMA/CA sem slots de tempo

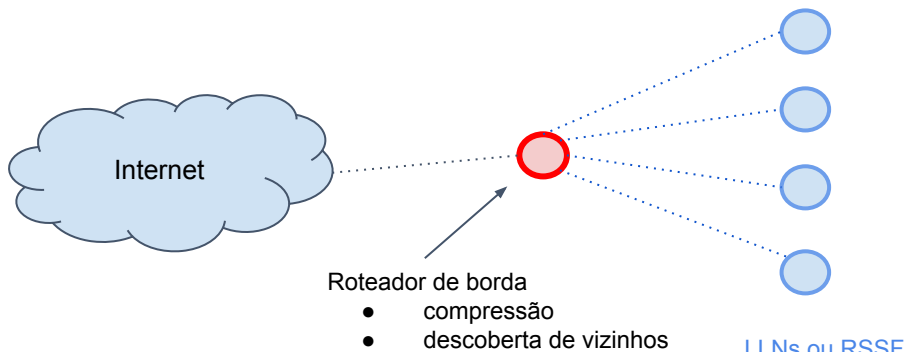
6lo trata de camadas de adaptação para outras tecnologias

IP sobre IEEE 802.15.4

- Cálculo do tamanho do cabeçalho
 - Cabeçalho IPv6 tem 40 octetos e UDP tem 8 octetos
 - IEEE 802.15.4 no mínimo 9 octetos (sem segurança) ou $9+21 = 30$ octetos (com segurança AES-CCM-128)
 - com o quadro 802.15.4 de 127 octetos, o espaço para aplicação:
 - $127 - 40 - 8 - 9 = 70$ octetos (sem segurança)
 - $127 - 40 - 8 - 30 = 49$ octetos (com segurança AES-CCM-128)
 - isso sem a segurança para a aplicação (DTLS)
- Requisitos de MTU do IPv6
 - Requer que o enlace suporte um MTU de 1280 octetos
 - → fragmentação e remontagem no 802.15.4

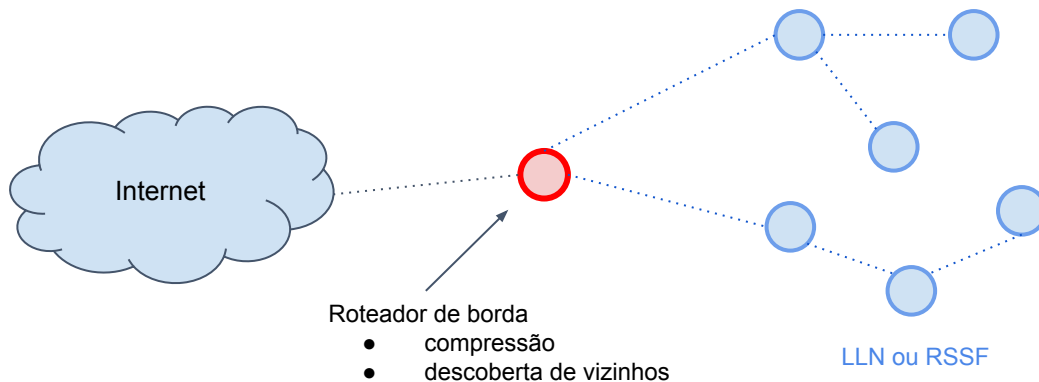
6lowpan e acesso à Internet

- Podemos conectar a RSSF à Internet através do protocolo 6LoWPAN e de um roteador de borda
- Se o roteador de borda for vizinho de todos os nós
 - nós sensores precisam apenas identificar o roteador de borda e comunicar-se com ele
 - No sentido contrário, o roteador precisa apenas transmitir os dados vindos da Internet diretamente para o(s) nó(s) sensor(es) de interesse



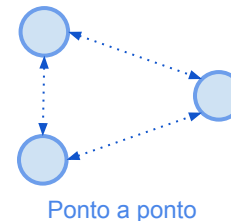
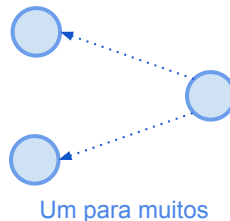
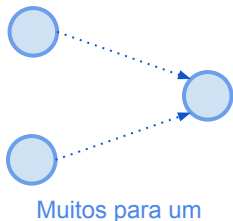
6lowpan e Internet: RSSF com múltiplos saltos

- E se o roteador de borda não for vizinho de todos os nós?
- E se a RSSF/LLN for uma rede ad hoc de múltiplos saltos?
 - Necessário protocolo de roteamento para a RSSF/LLN



RPL (Routing Protocol for LLN)

- RFC 6550
- *Low power and Lossy Networks* (LLN), ou seja, redes com baixo consumo de energia e tolerantes a perdas
- RPL se pronuncia Ripple
 - indicação da pronúncia em uma das RFCs!
- Padrões de tráfego suportados:

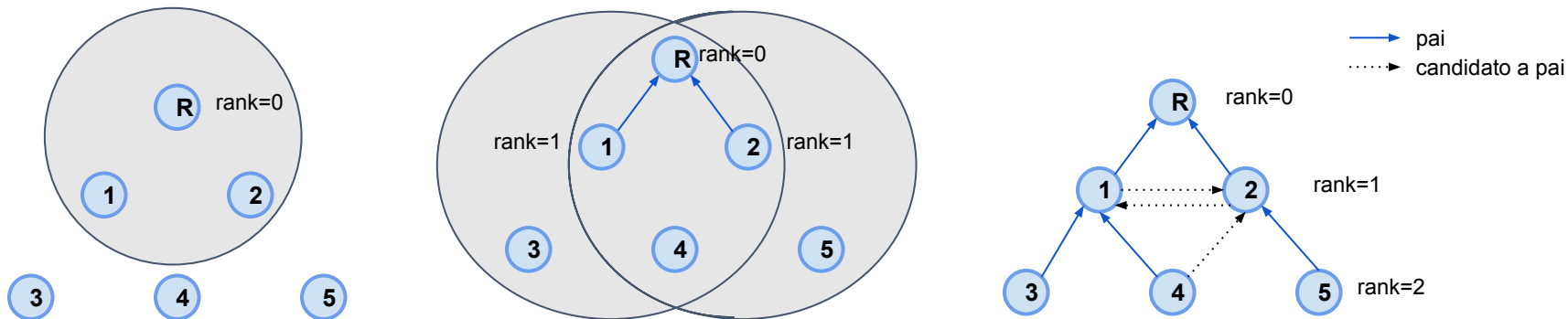


RPL: Características

- Funciona com 6LoWPAN
- Constrói um grafo acíclico dirigido orientado a destino (DODAG - *Destination Oriented Directed Acyclic Graph*)
- O “destino” padrão dos pacotes é a raiz do DODAG
- Após a construção do DODAG, todos os nós são capazes de alcançar a raiz
- Para a raiz alcançar nós, informações de alcançabilidade são disseminadas

Construção do DODAG

- A raiz transmite mensagens DIO (DODAG *Information Object*)
 - Primeiro DIO contém o valor mínimo para *rank*
- Cada nó seleciona seu pai, calculam seu *rank* e transmitem seu DIO
- Nós configurados para NÃO executarem roteamento não propagam DIO
- Este processo permite a comunicação **muitos para um**



Rotas para baixo

- Assim que o nó entra no DODAG ele pode alcançar a raiz
- Mas como a raiz pode alcançar os nós?
- Os nós deve anunciar os endereços alcançáveis por eles
- As mensagens DAO (*DODAG Destination Advertisement Object*) são utilizadas com este propósito
- Modos de Operação:
 - Duas formas de prover rotas para baixo
 - Modo de operação com armazenamento
 - Modo de operação sem armazenamento

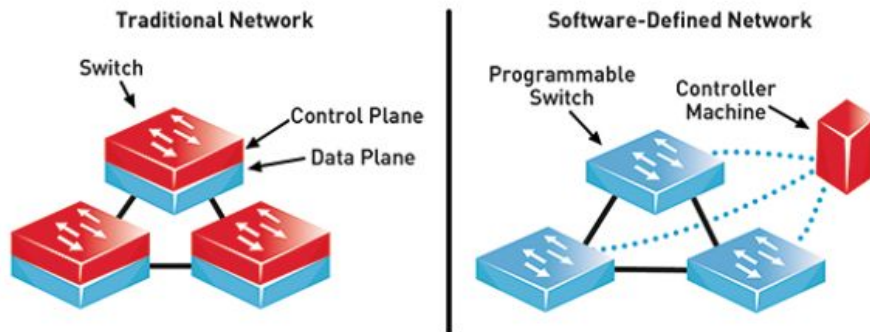
Software-defined networking aplicado a RSSF e IoT

Paradigma SDN

- SDN = *Software Defined Networking*
 - Redes definidas por software
- Conceito que já apareceu na literatura diversas vezes com outros nomes
 - *Active Networking*
- Ganhou força em 2008 com a apresentação de Keynote na conferência ACM SIGCOMM, na qual apresentou OpenFlow
 - e artigo na SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 2008 [1]
- Envolvimento da comunidade acadêmica e indústria

Diferenças para o paradigma tradicional

- Separação do plano de dados e plano de controle
- Centralização das decisões de rede
- Programabilidade
- Controlador

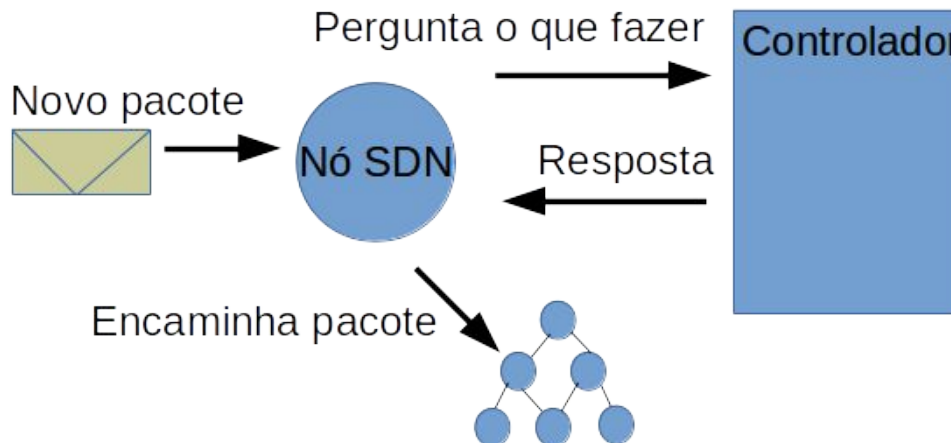


Fonte: <https://commsbusiness.co.uk/features/software-defined-networking-sdn-explained/>

Características

- Comunicação entre controlador e nós roteadores:
Southbound protocol
 - e.g. OpenFlow
- Fluxos podem ser determinados por informações além do endereço
- Tabela de fluxo
 - possibilidade de não identificar entrada válida (*mismatch*)
- Custo de comunicação adicional
- Início em redes cabeadas, flexibilidade e teste de novos protocolos
- Iniciativas posteriores em redes sem fio

Funcionamento (modo reativo)



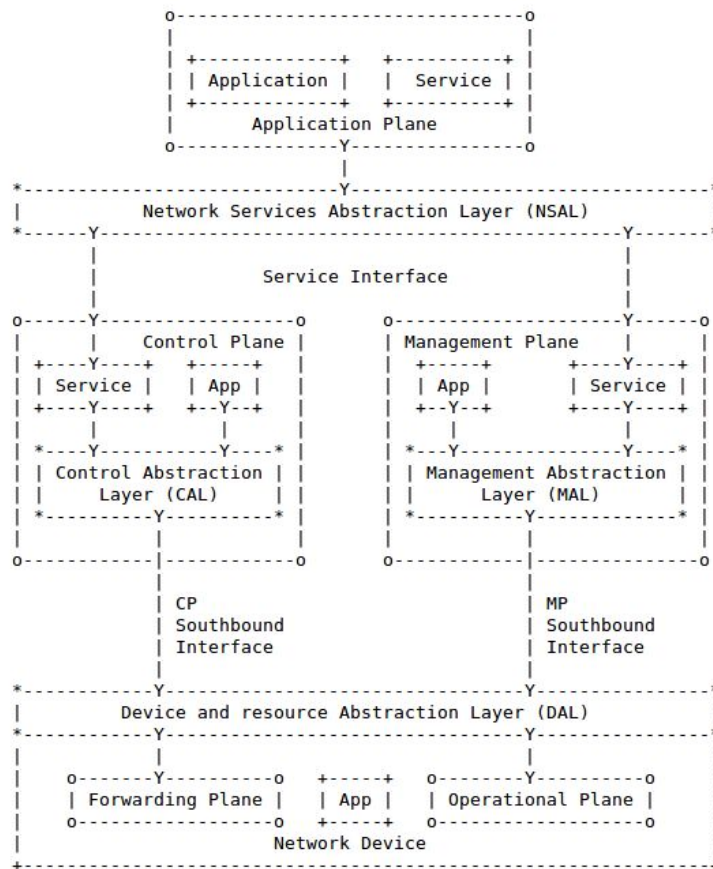


Figure 1: SDN Layer Architecture

<https://tools.ietf.org/html/rfc7426>

Motivação SDN para RSSF/IoT

- Necessidade de flexibilidade
 - Heterogeneidade + cenários diversos
- Otimização de rotas, uso de métricas variadas
- Gerenciamento de nós e da rede
- Flexibilidade/gerenciamento nas aplicações executadas na RSSF/IoT
- Transição/convivência entre protocolos

Desafios para SDN em RSSF/IoT

- *In-band control*
 - em redes cabeadas, plano de dados e controle utilizam *out-of-band control*
- Camada de enlace
 - MTU, taxa de transmissão
- Energia limitada
 - overhead de controle pode ser limitante!
- Dispositivos finais também são roteadores
- Topologias e tamanho da rede

SDN em RSSF/IoT

- Abordagens iniciais:
 - Dispositivos sem capacidade SDN, foco no controlador
 - Nós da RSSF/IoT sem capacidade SDN
 - Nós conectados a gateways SDN
 - Propostas de arquiteturas SDN para prover segurança e gerenciamento
 - Múltiplos domínios cujos gateways são controlados via SDN
 - Dispositivos com capacidade SDN comutando dados
 - Neste caso, é preciso tratar os desafios discutidos anteriormente

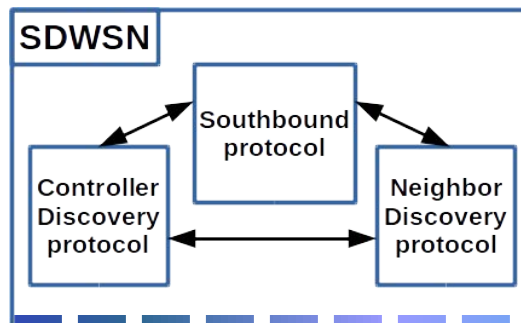
Primeiras propostas

- FlowSensor (2011) e Sensor Open Flow (2012)
 - Adaptação do OpenFlow: inadequado para RSSF
 - OpenFlow foi projetado para ambientes cabeados e com infraestrutura!
 - Boa discussão sobre possíveis benefícios de SDN para RSSF
- TinySDN (2014) e SDN-Wise (2015)
 - Arquitetura e protocolos projetados para RSSF
 - Consideram os desafios e limitações destas redes
 - Possuem implementação em testbeds
 - Demonstram funcionalidades e viabilidade
 - Análise de desempenho limitada, mas indicam que abordagem é promissora

Arcabouço IT-SDN

IT-SDN (2017) [12]

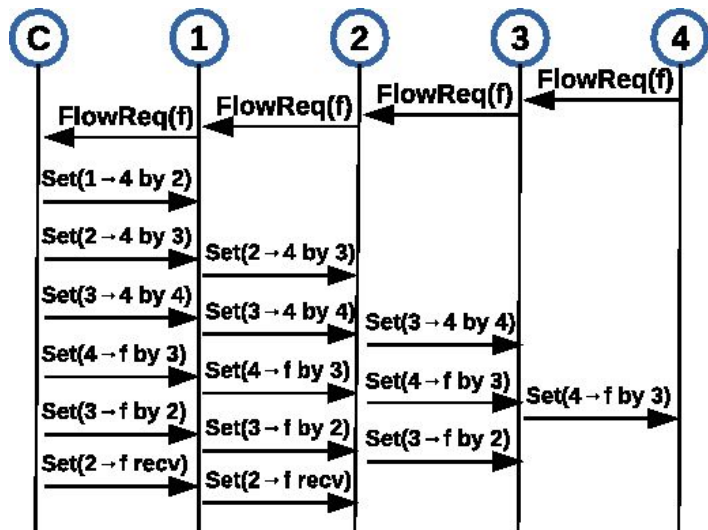
- Ferramenta para experimentação de SDN em RSSF
- Arquitetura independente de Sistema Operacional
 - implementação existente no Contiki SO
- Completamente aberta
- Separação arquitetural
 - Protocolo southbound utilizado para comunicação entre controlador e dispositivos
 - Protocolos de descoberta de vizinhos e de controlador podem ser substituídos



IT-SDN: tipos de pacote

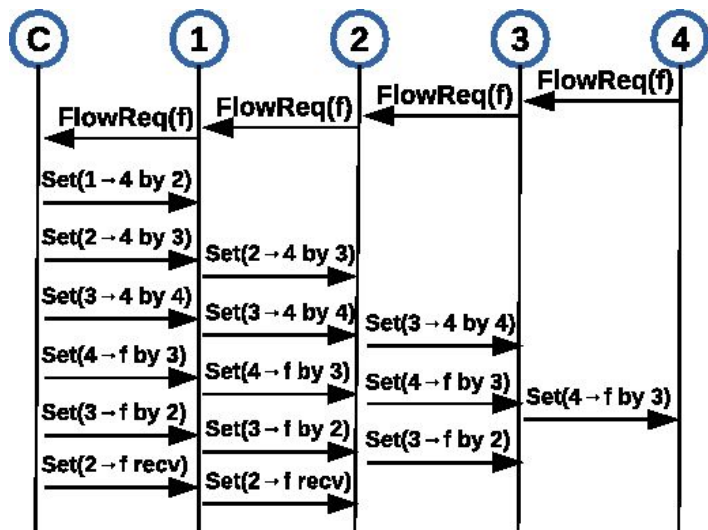
- Flow request
- Flow setup
 - Comum
 - Roteado pela origem (source routed)
 - Múltiplo
- Acknowledgement
- Descoberta de vizinhos / controlador
- Anúncio de vizinhos
- Dados

Ex.: Configuração de fluxo f para o nó 2

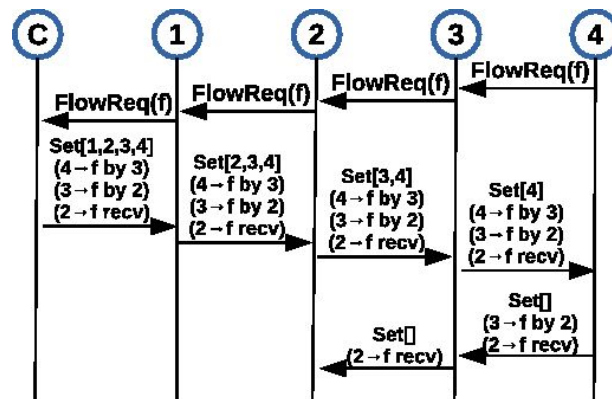


Normal

Ex.: Configuração de fluxo f para o nó 2



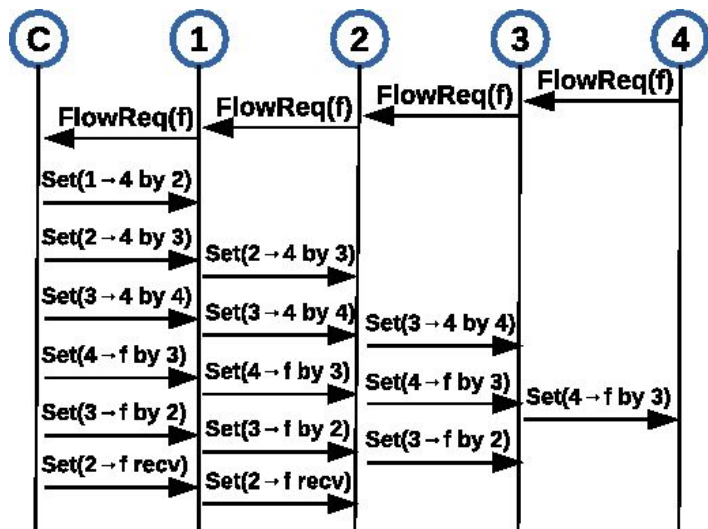
Normal



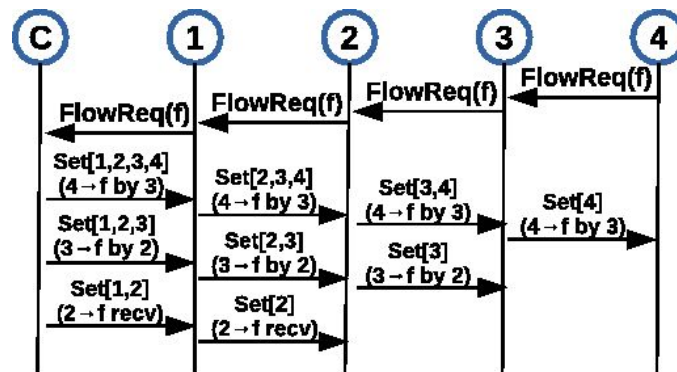
Múltiplo

Para configurar pela primeira vez um nó a 4 saltos do controlador, reduz-se a quantidade de pacotes de controle em 53% para múltiplo.

Ex.: Configuração de fluxo f para o nó 2



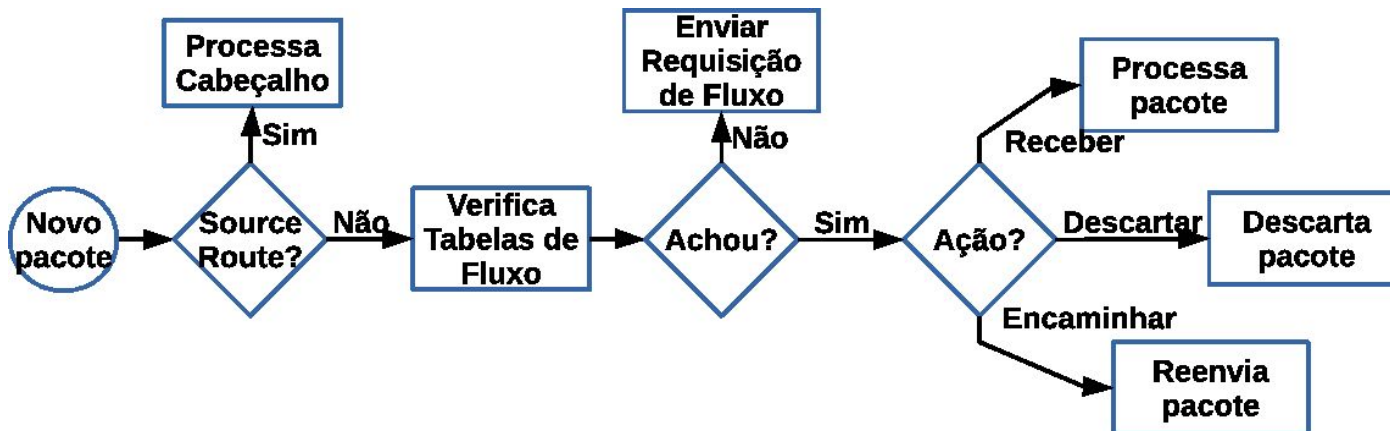
Normal



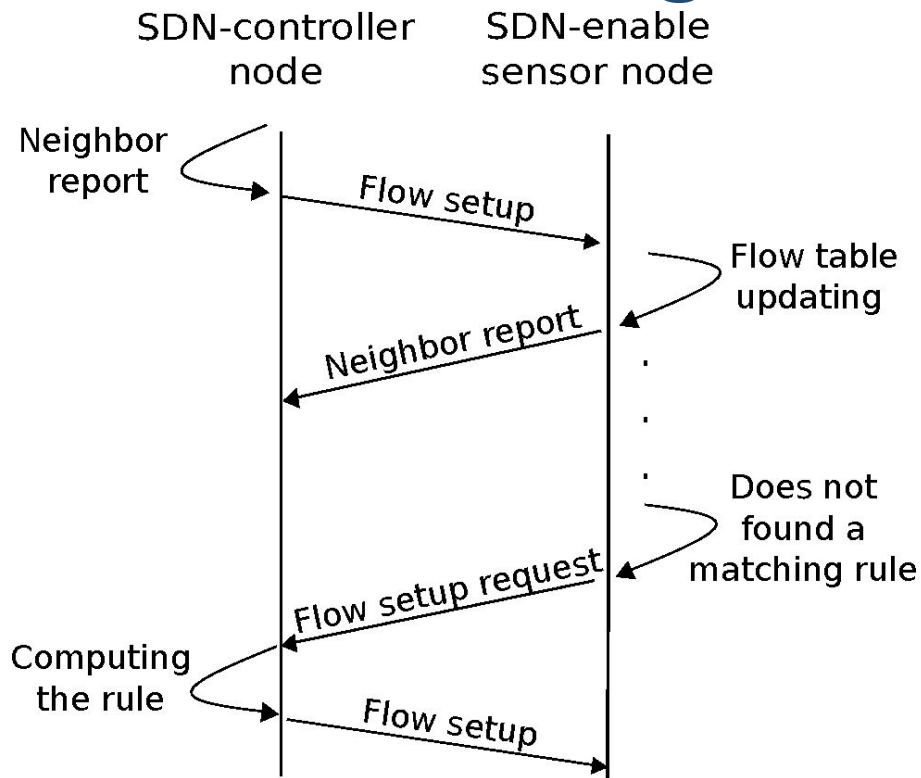
Source routed

Para configurar pela primeira vez um nó a 4 saltos do controlador, reduz-se a quantidade de pacotes de controle em 40% quando usa source routed.

IT-SDN: fluxo de trabalho



IT-SDN: troca de mensagens



IT-SDN: desempenho [13]

*“Software-Defined Networking is a promising paradigm for providing flexibility and programmability to computer networks. Our goal is to assess the performance of this paradigm applied to Wireless Sensor Networks. Previous evaluations are not complete, since they study small networks, do not explore crucial performance metrics, or solely examine light traffic conditions. For this, we execute simulations and a testbed experiment. The testbed shows Software-Defined Networking successfully operates in a real network. **We study simulated networks up to 289 data-transmitting nodes, while assessing all the main networks metrics: data delivery, delay, control overhead, and energy consumption.** We investigate important parameters for Software-Defined Wireless Sensor Networks, such as controller positioning, radio duty cycling, number of data sinks, and use of source routed control messages. **The results indicate that Software-Defined Networking is feasible for Wireless Sensor Networks, presenting competitive data delivery ratio while saving energy in comparison to RPL, the Routing Protocol for Low-power and lossy networks.**”*

IT-SDN: pacotes de controle *source-routed*

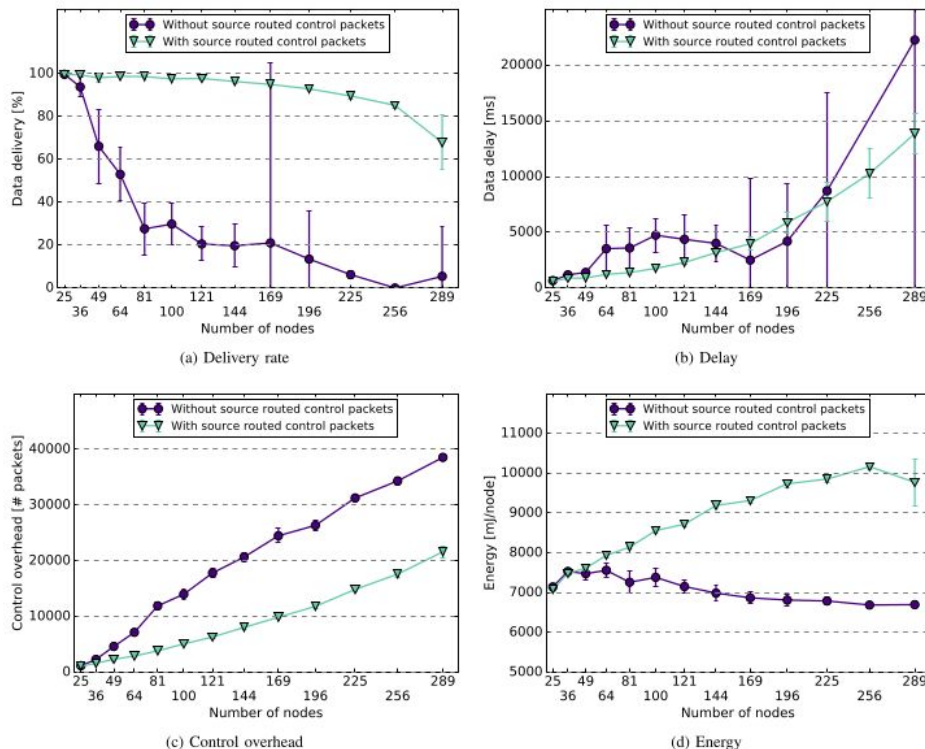


FIGURE 6. Results from the usage of source-routed control packets. Source-routed control packets are instrumental to SDWSN scalability.

IT-SDN: impacto do RDC

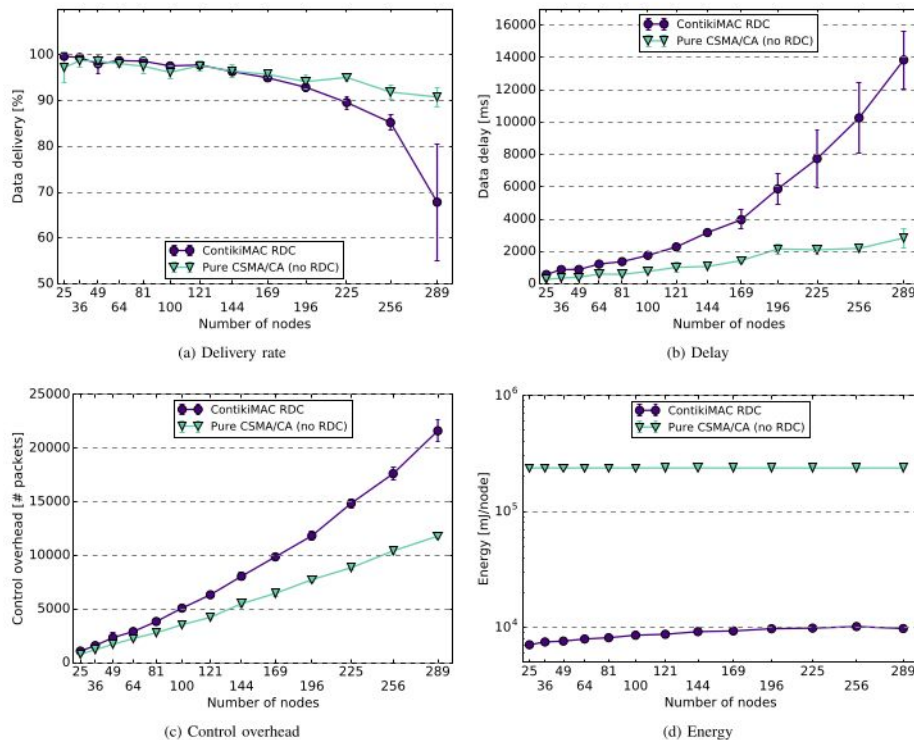


FIGURE 7. Impact of radio duty cycling. RDC is a necessary evil, as energy efficiency comes with performance degradation in large networks.

IT-SDN: múltiplos sorvedouros de dados

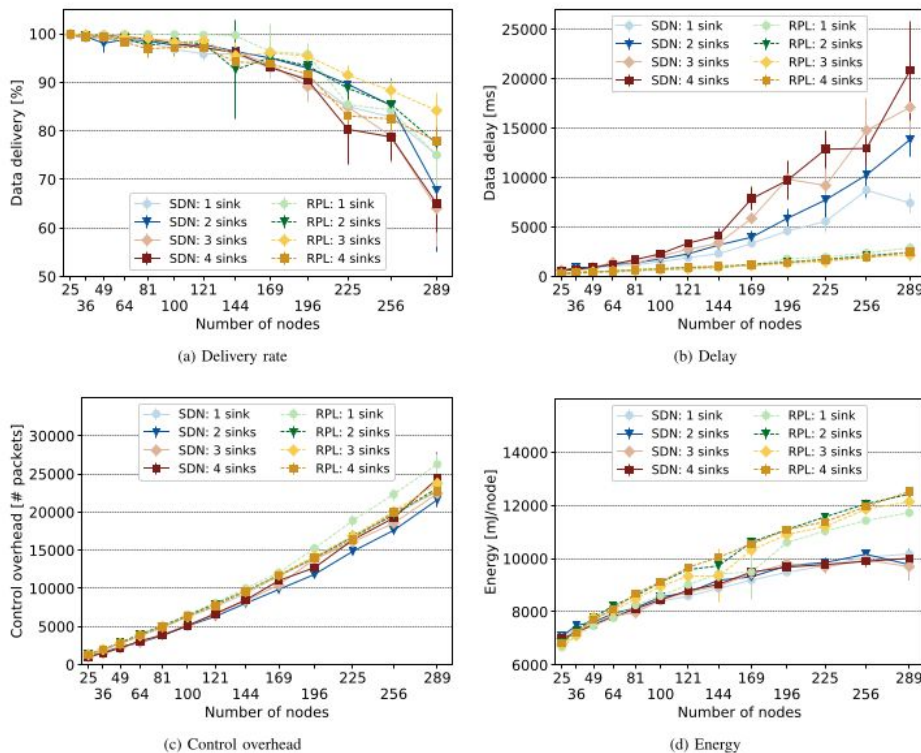


FIGURE 8. Multiple sinks results.

Considerações sobre desempenho

- Protocolos de roteamento tradicionais são distribuídos
 - mais tolerantes a falhas, pois não dependem do controlador
- Desempenho:
 - Expectativa da literatura: paradigma SDN tem maior *overhead* devido a comunicação dos nós com controlador, o que poderia levar a:
 - menor taxa de entrega
 - maior atraso
 - maior consumo de energia
 - Resultados para o IT-SDN demonstram que:
 - taxa de entrega e overhead comparável ao RPL
 - atraso decorre do modo de operação reativo do IT-SDN
 - consumo de energia menor

Trabalhos utilizando o IT-SDN no grupo

- **Modelos e previsão de consumo de energia** - Mestrado do Gustavo:
 - MARGI, CINTIA; NÚÑEZ, GUSTAVO . Energy Map Model for Software-Defined Wireless Sensor Networks. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro, SP. Anais de XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017.
- **Métricas de roteamento** - Mestrado do Doriedson:
 - MARGI, CINTIA; OLIVEIRA, DORIEDSON . Roteamento ciente de energia em redes de sensores sem fio definidas por software. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017, São Pedro, SP. Anais de XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017.
 - OLIVEIRA, DORIEDSON A. G. ; Margi, Cintia B. . *Combining Metrics for Route Selection in SDWSN: Static and Dynamic Approaches Evaluation*. In: 2018 IEEE 10th LatinAmerican Conference on Communications (LATINCOM).
- **Enlaces assimétricos** - Doutorado do Renan:
 - MARGI, CINTIA; ALVES, RENAN . Discovery protocols for SDN-based Wireless Sensor Networks with unidirectional links. In: XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017
 - AFONSO ALVES, RENAN CERQUEIRA ; Margi, Cintia Borges ; KUIPERS, FERNANDO A. . No way back? An SDN protocol for directed IoT networks. In: 2019 15th Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS).
 - Alves, Renan Cerqueira Afonso ; Margi, Cintia Borges ; Kuipers, Fernando A. . *Know when to listen: SDN-based protocols for directed IoT networks*. Computer Communications, v. 150, p. 672-686, 2020.
 - Alves, R. C. A. ; Margi, C.B. . *Can You Hear Me? A Metric for Link Asymmetry*. Open Journal of Internet of Things (OJIOT), v. 6, p. 82-88, 2020.

Trabalhos utilizando o IT-SDN no grupo

- **Segurança - Doutorado do Gustavo:**
 - Segura, G. A. N. ; Margi, C.B. ; Chorti, A. . *Understanding the Performance of Software Defined Wireless Sensor Networks under Denial of Service Attack*. Open Journal of Internet of Things (OJIOT), v. 5, p. 58-68, 2019.
 - SEGURA, GUSTAVO A. NUNEZ ; SKAPERAS, SOTIRIS ; CHORTI, ARSENIA ; MAMATAS, LEFTERIS ; Margi, Cintia Borges . *Denial of Service Attacks Detection in Software-Defined Wireless Sensor Networks*. In: 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops).
 - SEGURA, GUSTAVO A. NUNEZ ; CHORTI, ARSENIA ; Margi, Cintia Borges . *Multimetric Online Intrusion Detection in Software-Defined Wireless Sensor Networks*. In: 2020 IEEE LatinAmerican Conference on Communications (LATINCOM).
- **Monitoramento da rede - Thamires:**
 - LUZ, THAMIRES C. ; NUNEZ, GUSTAVO A. ; Margi, Cintia B. ; VERDI, FABIO L. . *In-network performance measurements for Software Defined Wireless Sensor Networks*. In: 2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC).

Considerações finais

- Arcabouço IT-SDN tem desempenho comparável ao RPL
- Demais trabalhos usando o arcabouço demonstram:
 - Possibilidade de otimização de rotas, uso de métricas variadas
 - Benefícios com a previsão de consumo de energia
 - Benefícios para enlaces assimétricos
 - Flexibilidade no gerenciamento das aplicações executadas na RSSF/IoT
- Com isso, pode-se colher os benefícios esperados para o uso do paradigma SDN em RSSF e IoT
 - compartilhamento de recursos de rede e dispositivos
 - flexibilidade do uso da infraestrutura RSSF/IoT

Bibliografia

1. R. Want, B. N. Schilit and S. Jenson, "Enabling the Internet of Things," in Computer, vol. 48, no. 1, pp. 28-35, Jan. 2015, doi: 10.1109/MC.2015.12.
2. Hill, Jason, et al. "System architecture directions for networked sensors." ACM SIGOPS operating systems review. Vol. 34. No. 5. ACM, 2000.
3. Tan, Su-Lim, and B. Tran Nguyen. "Survey and performance evaluation of real-time operating systems (RTOS) for small microcontrollers." (2009).
4. Farooq, Muhammad Omer, and Thomas Kunz. "Operating systems for wireless sensor networks: A survey." Sensors 11.6 (2011): 5900-5930.
5. Andersen, Michael P., and David E. Culler. "System Design Trade-Offs in a Next-Generation Embedded Wireless Platform." (2014).
6. D. Culler, D. Estrin and M. Srivastava, "Guest Editors' Introduction: Overview of Sensor Networks," in Computer, vol. 37, no. 8, pp. 41-49, Aug. 2004, doi: 10.1109/MC.2004.93.
7. "Towards a Definition of the Internet of Things (IoT). Revision 1 - 27/May/2015".
https://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf
8. 6LoWPAN - <https://datatracker.ietf.org/wg/6lowpan/>
9. 6lo - <https://datatracker.ietf.org/wg/6lo/>
10. ROLL - <https://datatracker.ietf.org/wg/roll/>
11. CORE - <https://datatracker.ietf.org/wg/core/>
12. RFC 4944: "Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4", Sept 2007, <https://tools.ietf.org/html/rfc4944>
13. RFC 6550: "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks", March 2012, <https://tools.ietf.org/html/rfc6550>
14. "Energy Consumption and Memory Footprint Evaluation of RPL and CTP in TinyOS". Margi, Cintia; Albertini, Bruno ; Rodrigues, Tiago ; Oliveira, Bruno ; Ogawa, Henrique. In: XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2016, Santarém, PA. Anais de XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, 2016. <http://dx.doi.org/10.14209/sbrt.2016.168>
15. "TSCH and 6TiSCH for Contiki: Challenges, Design and Evaluation", S. Duquennoy, A. Elsts, B. A. Nahas and G. Oikonomo, DCOSS 2017. Ottawa, ON, 2017, pp. 11-18. doi: 10.1109/DCOSS.2017.29

Referências sobre SDN

- [1] Nick McKeown, Tom Anderson, Hari Balakrishnan, Guru Parulkar, Larry Peterson, Jennifer Rexford, Scott Shenker, and Jonathan Turner. 2008. "OpenFlow: enabling innovation in campus networks". SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 38, 2 (April 2008), 69–74. DOI:<https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>
- [2] "Software-Defined Networking (SDN): Layers and Architecture Terminology". Haleplidis, et al. Jan/2015. <https://tools.ietf.org/html/rfc7426>
- [3] V. Tadinada, "Software defined networking: Redefining the future of internet in iot and cloud era," in Future Internet of Things and Cloud(FiCloud), 2014 International Conference on, Aug 2014, pp. 296–301.
- [4] Z. Qin, G. Denker, C. Giannelli, P. Bellavista, and N. Venkatasubramanian, "A software defined networking architecture for the internet-of-things," in Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 IEEE, May 2014, pp. 1–9
- [5] T. Luo, H.-P. Tan, and T. Q. S. Quek, "Sensor openflow: Enabling software-defined wireless sensor networks." IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 11, pp. 1896–1899, 2012.
- [6] L. Galluccio, S. Milardo, G. Morabito, and S. Palazzo, "SDN-WISE: Design, prototyping and experimentation of a stateful SDN solution for Wireless Sensor networks," in 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), April 2015, pp. 513–521.
- [7] B. T. de Oliveira, C. B. Margi, and L. B. Gabriel, "TinySDN: Enabling multiple controllers for software-defined wireless sensor networks," in Communications (LATINCOM), 2014 IEEE Latin-America Conference on, Nov 2014, pp. 1–6
- [8] S. Costanzo, L. Galluccio, G. Morabito, and S. Palazzo, "Software defined wireless networks: Unbridling sdn," in Proceedings of the 2012 European Workshop on Software Defined Networking, ser. EWSDN '12. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/EWSDN.2012.12>
- [9] B. T. de Oliveira and C. B. Margi, "Distributed control plane architecture for software-defined wireless sensor networks," in 20th IEEE International Symposium on Consumer Electronics (IEEE ISCC 2016), 2016.
- [10] B. T. de Oliveira, R. C. A. Alves, and C. B. Margi, "Software-defined wireless sensor networks and internet of things standardization synergism," Standards for Communications and Networking (CSCN), 2015 IEEE Conference on, October 2015, pp. 96–101.
- [11] **H. I. Kobo, A. M. Abu-Mahfouz and G. P. Hancke, "A Survey on Software-Defined Wireless Sensor Networks: Challenges and Design Requirements," in IEEE Access, vol. 5, pp. 1872-1899, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2666200.**
- [12] ALVES, R. C. A. ; OLIVEIRA, D. A. G. ; SEGURA, G. A. N. ; MARGI, C. B. . IT-SDN: Improved architecture for SDWSN. In: SBRC 2017 - Salão de Ferramentas, 2017, Belem. SBRC 2017 - Salão de Ferramentas. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2017.
- [13] ALVES, RENAN C. A. ; OLIVEIRA, DORIEDSON A. G. ; SEGURA, GUSTAVO A. NUNEZ ; Margi, Cintia B. . The cost of Software-Defining Things: a scalability study of Software-Defined Sensor Networks. IEEE Access, v. 7, p. 115093-115108, 2019.

Paradigma de redes definidas por software aplicado a redes de sensores sem fio e Internet das Coisas

Obrigada!

