

**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

Câmpus
São José

Bluetooth Low Energy

Curso: Engenharia de Telecomunicações
Disciplina: CSF29008 - Comunicações Sem Fio
Professor: Mario de Noronha Neto

Aluno

João Pedro Menegali Salvan Bitencourt

Visão Geral

Visão Geral

- A tecnologia Bluetooth em si surgiu em 1994, criado pela Ericsson que queria encontrar uma forma de melhorar as capacidade dos dispositivos móveis;
- Dr. Jaap Haartsen foi o encarregado e trabalhava na área de Terminais Móveis da Ericsson;

Dr. Jaap Haartsen

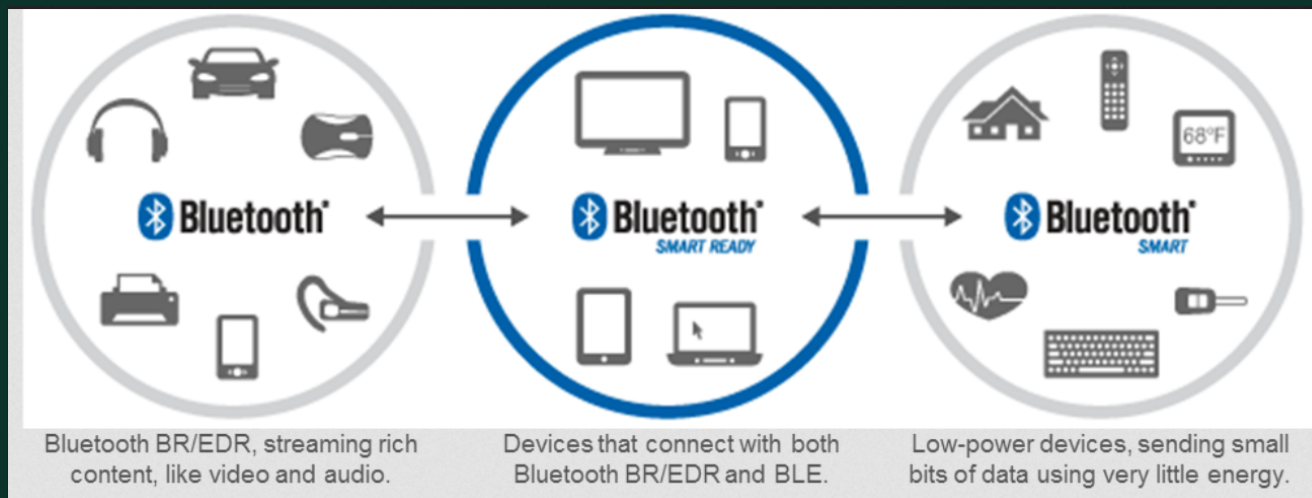


Fonte: likesunar.shop

Visão Geral

- Já a tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) foi introduzida em 2009, com o lançamento do Bluetooth 4.0, tendo o nome comercial de Bluetooth Smart;
- O objetivo era entrar no mercado de dispositivos IoT (*Internet of Things*), criando um padrão que permitisse a esses dispositivos ficarem ligados por anos consumindo pouca energia;

Tecnologias de Bluetooth BR/EDR e BLE.



Fonte: community.silabs.com

Visão Geral

- O foco da tecnologia Bluetooth em si é a comunicação a curta distância;
- A especificação original foi apelidada de Bluetooth Classic;
- As duas tecnologias não são compatíveis entre si por conta da capacidade de canal ser muito diferente para cada especificação;
- O Bluetooth clássico também pode ser chamado de Bluetooth BR/EDR (*Basic Rate/Enhanced Data Rate*);
- Atualmente, a tecnologia Bluetooth é gerenciada pelo Bluetooth Special Interest Group (SIG), que é responsável por governar os padrões do Bluetooth, incluindo o que eles fazem, como funcionam tecnicamente, certificação e interoperabilidade, *branding* e evolução dos padrões;

Camada física

Camada física

- O rádio do Bluetooth Low Energy opera na faixa de 2,4 GHz, variando de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz;
- A largura de banda do canal é de 2 MHz e a banda de operação é dividida em 40 canais ($k = 0, 1, \dots, 39$);
- A frequência central do k -ésimo canal é dada por:

$$f(k) = (2402 + k \times 2) \text{ MHz}$$

- Com relação a potência máxima de transmissão:
 - Classe 1: 100 mW (20 dBm);
 - Classe 1.5: 10 mW (10 dBm);
 - Classe 2: 2,5 mW (4 dBm);
 - Classe 3: 1 mW (0 dBm);

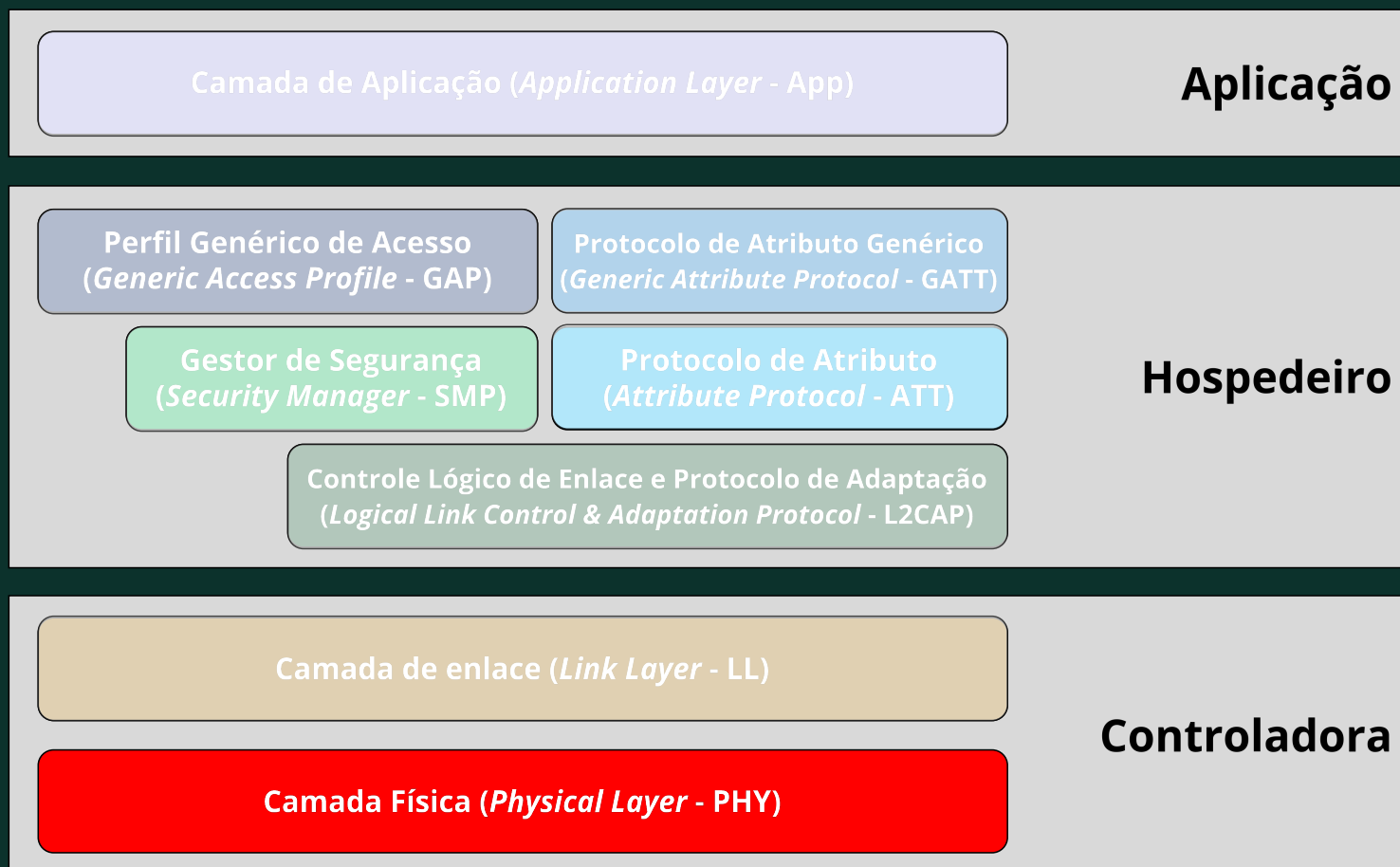
Camada física

- Taxa de transferência Low Energy (LE):
 - S8 (LE Coded PHY modo $S = 8$): 125 Kb/s. Cada bit é representado por 8 símbolos. Possui quatro vezes mais alcance do LE 1M PHY;
 - S2 (LE Coded PHY modo $S = 2$): 500 Kb/s. Cada bit é representado por 2 símbolos. Possui o dobro do alcance do LE 1M PHY;
 - LE 1M PHY: 1 Mb/s;
 - LE 2M PHY: 2 Mb/s;
- Técnica de espalhamento espectral: FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*);
- Esquema de modulação: GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying* - Chaveamento de Frequência Gaussiano);

Camada física

- A figura abaixo ilustra a camada física como sendo a mais baixa na pilha do protocolo e provê serviços para a camada de enlace:

Arquitetura do Bluetooth Low Energy, com destaque para a camada física.

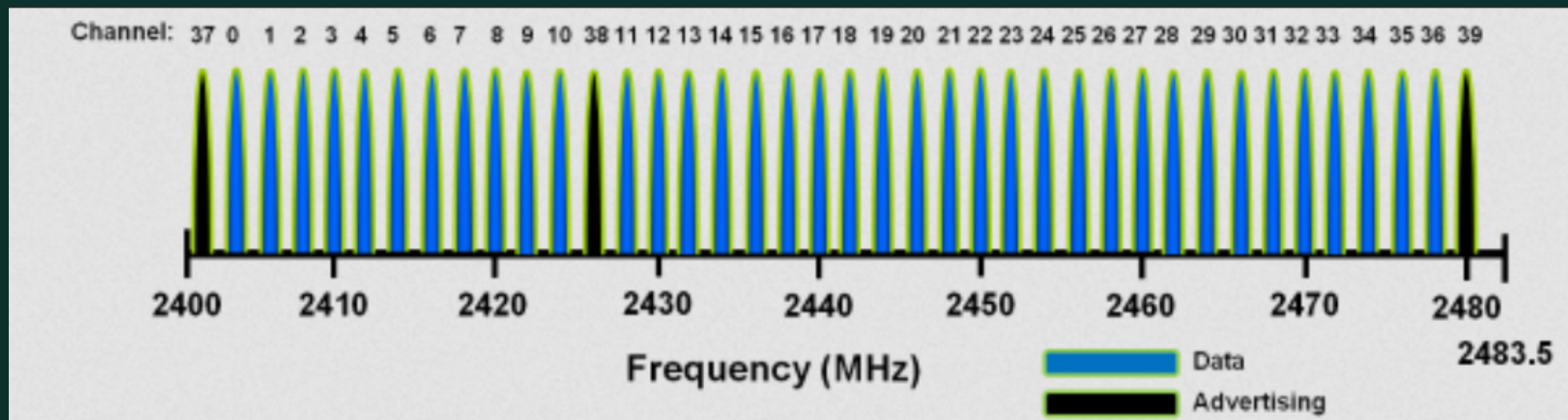


Fonte: developerhelp.microchip.com (adaptado)

Camada física

- Abaixo, está a ilustração da faixa de frequências utilizada. 2.4 GHz é a chamada banda Industrial, Científica e Médica (*Industrial, Scientific and Medical* - ISM):

Ilustração da banda de cada canal, bem como a faixa de frequência a qual cobrem.



Fonte: developerhelp.microchip.com

- Os 40 canais são divididos em três canais de anúncio (canais 37, 38 e 39) e 37 canais de dados (canais 0 a 36);

Camada física

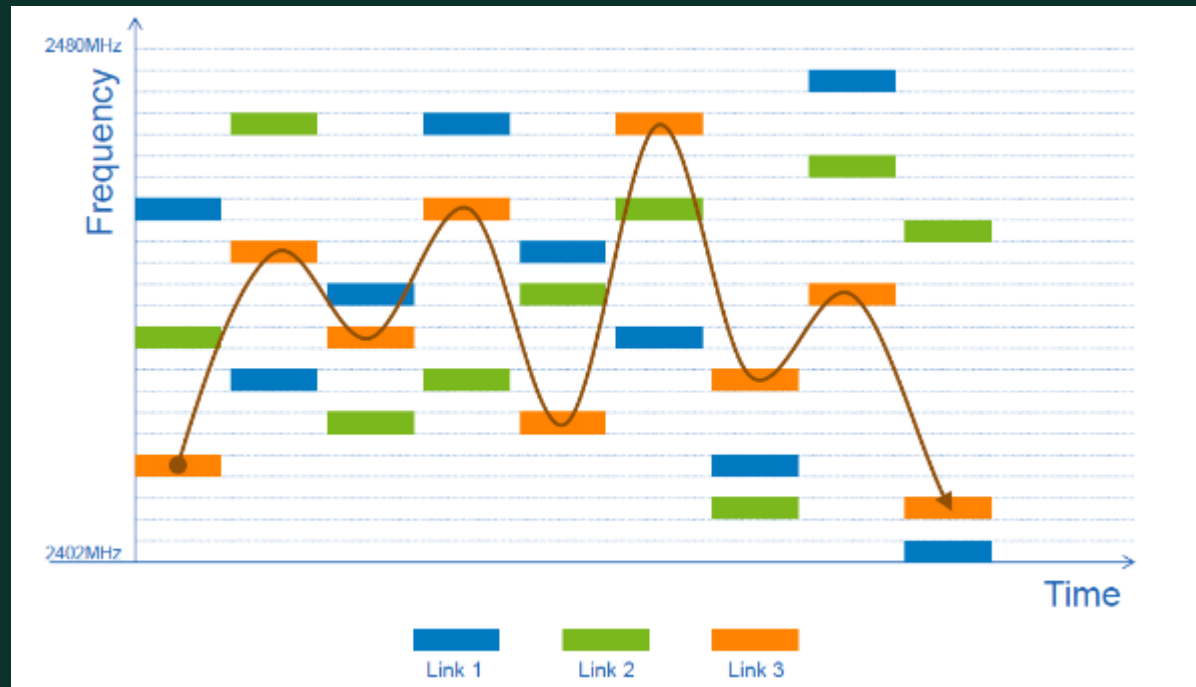
- Canais de anúncio:
 - Descobrir dispositivos próximos;
 - Estabelecer conexões;
 - Fazer transmissão em *broadcast*;
- Canais de dados:
 - Comunicação entre dispositivos conectados;
 - Possuem frequência de saltos adaptativa, utilizadas para eventos de conexão subsequentes.
- Quando está transmitindo pelo canal de dados, um algoritmo de salto de frequência é utilizado para circular pelos 37 canais de dados:

$$f_n + 1 = (f_n + \text{hop}) \bmod 37$$

Camada física

- f_n é a frequência (canal) que será utilizado no próximo evento de conexão e hop é um valor que varia entre 5 e 16, sendo definido quando a conexão é criada.

Ilustração do algoritmo de salto de frequência.



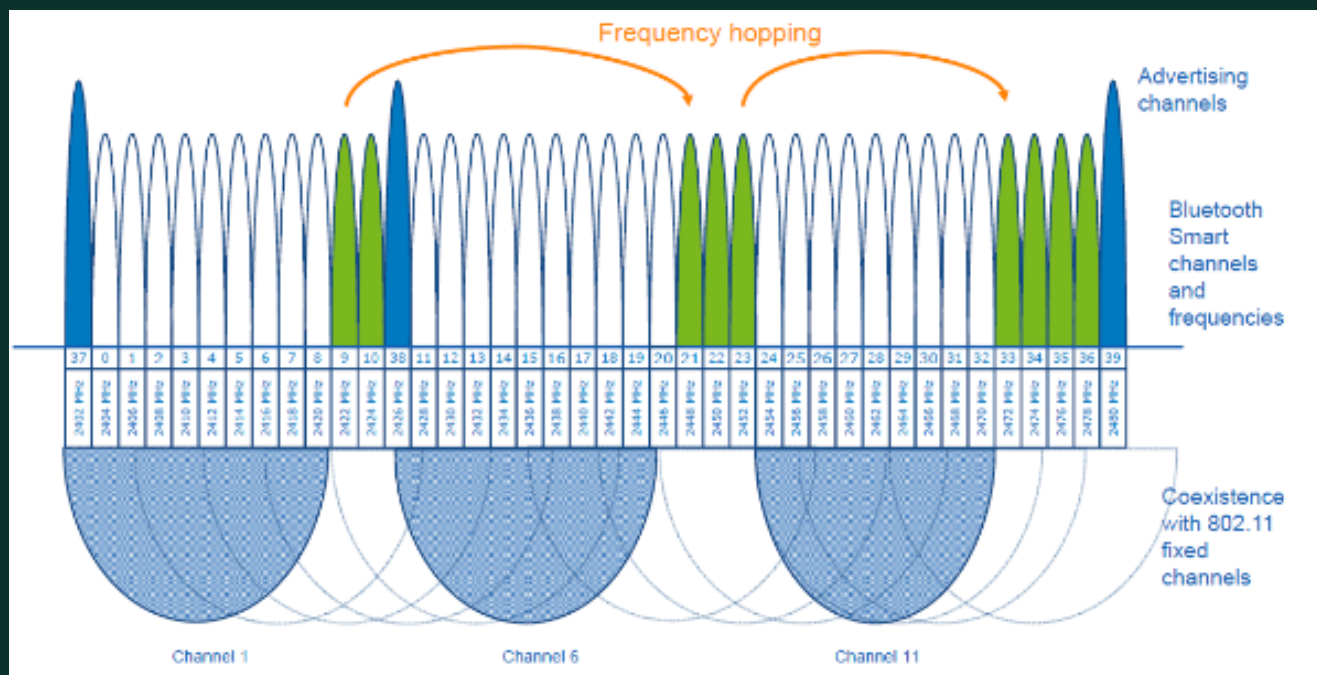
Fonte: developerhelp.microchip.com

- Essa frequência adaptativa é útil para evitar interferências de outros dispositivos que operam na mesma faixa de frequência;

Camada física

- Na figura abaixo, é mostrado o espectro de redes Wi-Fi e o algoritmo selecionando os canais com menor interferência.
- No exemplo, os canais 0 a 8, 11 a 20 e 24 a 32 são marcados como canais ruins, sendo evitados na próxima troca.

Seleção dos canais com a menor probabilidade de interferência.



Fonte: developerhelp.microchip.com

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

- Na camada de enlace, o endereçamento é semelhante ao *Media Access Control* (MAC) utilizado no padrão Ethernet e Wi-Fi®, utilizando um endereço de 48 bits, que identifica unicamente cada dispositivo BLE;
- Há dois tipos de endereçamento:
 - Público: endereço obtido junto a *IEEE Registration Authority*, sendo os 24 bits mais significativos o identificador do fabricante e os 24 bits menos significativos o identificador do dispositivo em si;
 - Aleatório:
 - Estático: um novo endereço é gerado a cada ciclo de energia;
 - Privado: o endereço pode ser alterado periodicamente permitindo que o dispositivo não seja rastreável.

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

- Comunicação unicast (*Peer-Peer*):
 - ▶ Inicialmente, ambos dispositivos estão desconectados em modo de baixo consumo (*Standby*);
 - ▶ Entram em modo de descoberta (*Discovery*), cujo dispositivo que será descoberto torna-se o Anunciante (*Advertiser*) e o que deseja se conectar, o Observador (*Scanner*);
 - ▶ O Anunciante envia pacotes de anúncio contendo informações básicas sobre o dispositivo. Todos os Observadores recebem esses pacotes.

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

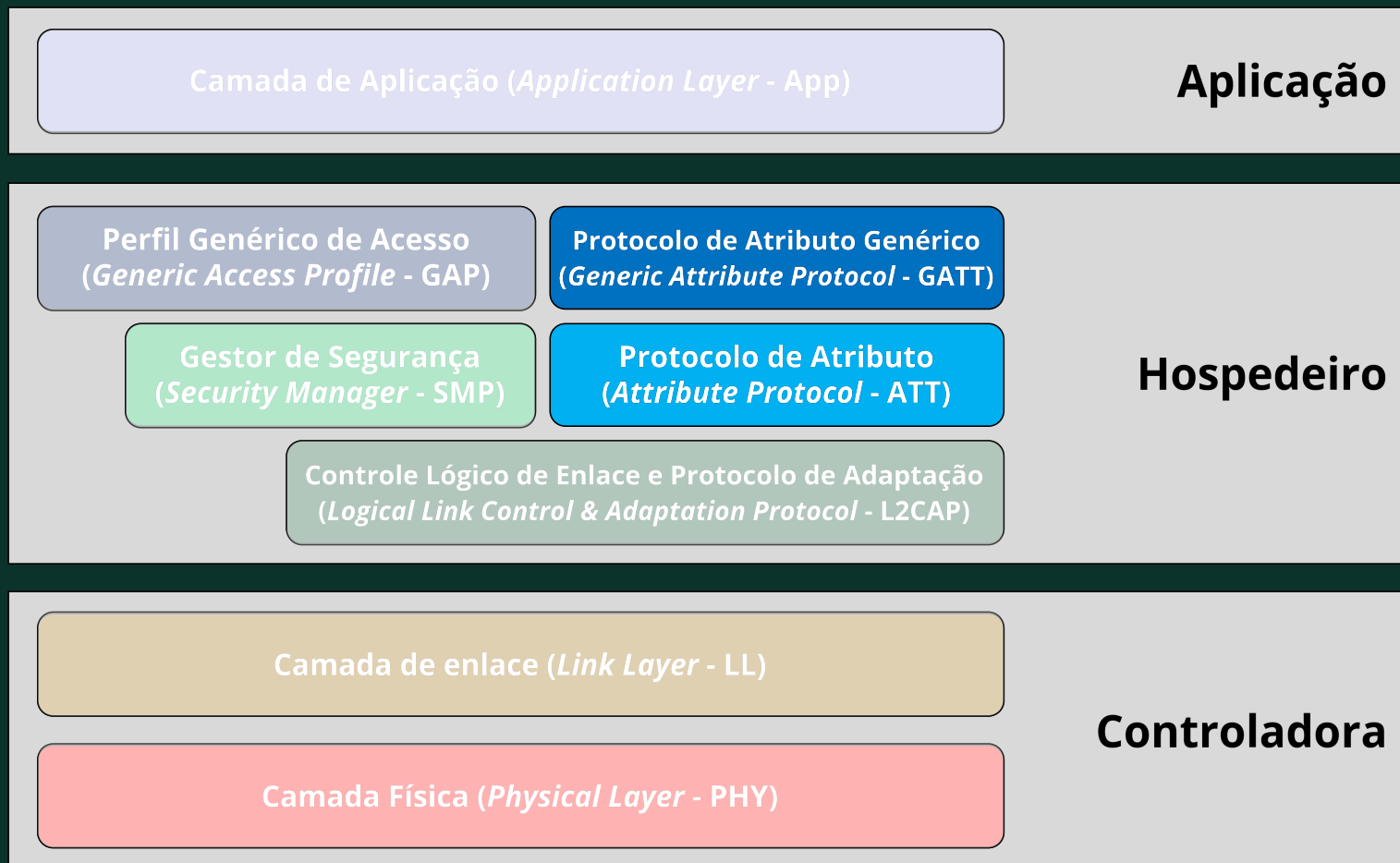
- Comunicação broadcast:
 - Os papéis definidos são o Transmissor (*Broadcaster*), que é o dispositivo enviando os pacotes, e o Observador (*Scanner*);
 - As mensagens pode ser enviadas de um para um ou de um para muitos.

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

- O Bluetooth Low Energy utiliza o protocolo de comunicação GATT (*Generic Attribute Profile*), que utiliza o protocolo ATT (*Attribute Protocol*) como mecanismo de transporte;
- O GATT define como o dado será organizado e transferido através de uma conexão BLE;
- Dentre as características do GATT, destaca-se:
 - Identificadores Únicos e Universais (*UUIDs*);
 - Papeis (*Roles*);
 - Atributos (*Attributes*);
 - Organização de dados (*Data Organization*).

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

Pilha de protocolo do Bluetooth Low Energy, com destaque para o GATT e ATT.



Fonte: developerhelp.microchip.com (adaptado)

Técnicas de acesso ao meio e protocolos de comunicação

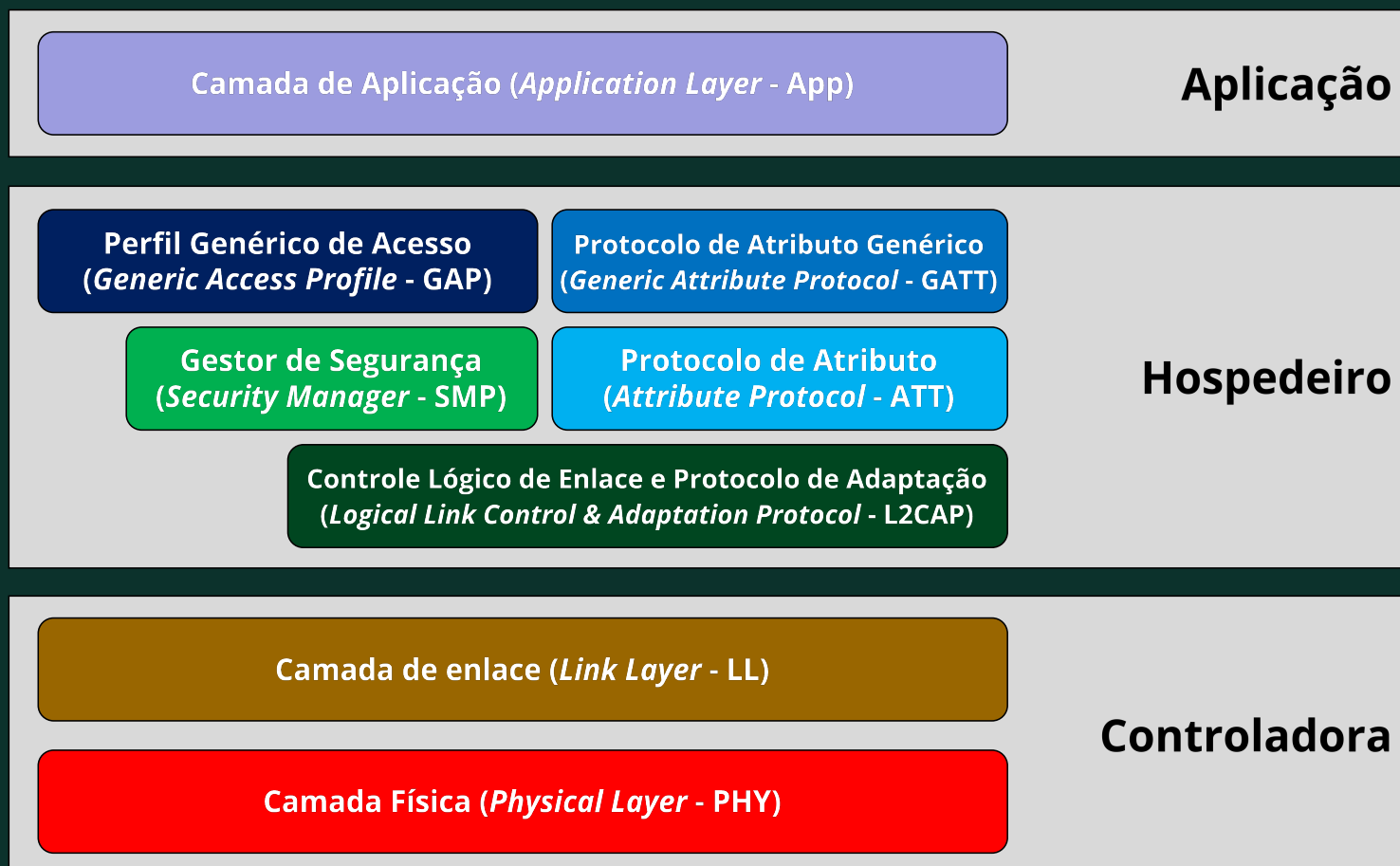
- O *Generic Access Profile* (GAP) é responsável por definir os papéis dos dispositivos BLE, bem como:
 - Descobrir e conectar com pares;
 - Transmitir dados;
 - Estabelecer conexões seguras.

Arquitetura básica

Arquitetura básica

- A ilustração abaixo mostra a pilha de protocolo do Bluetooth Low Energy:

Pilha de protocolo do Bluetooth Low Energy.



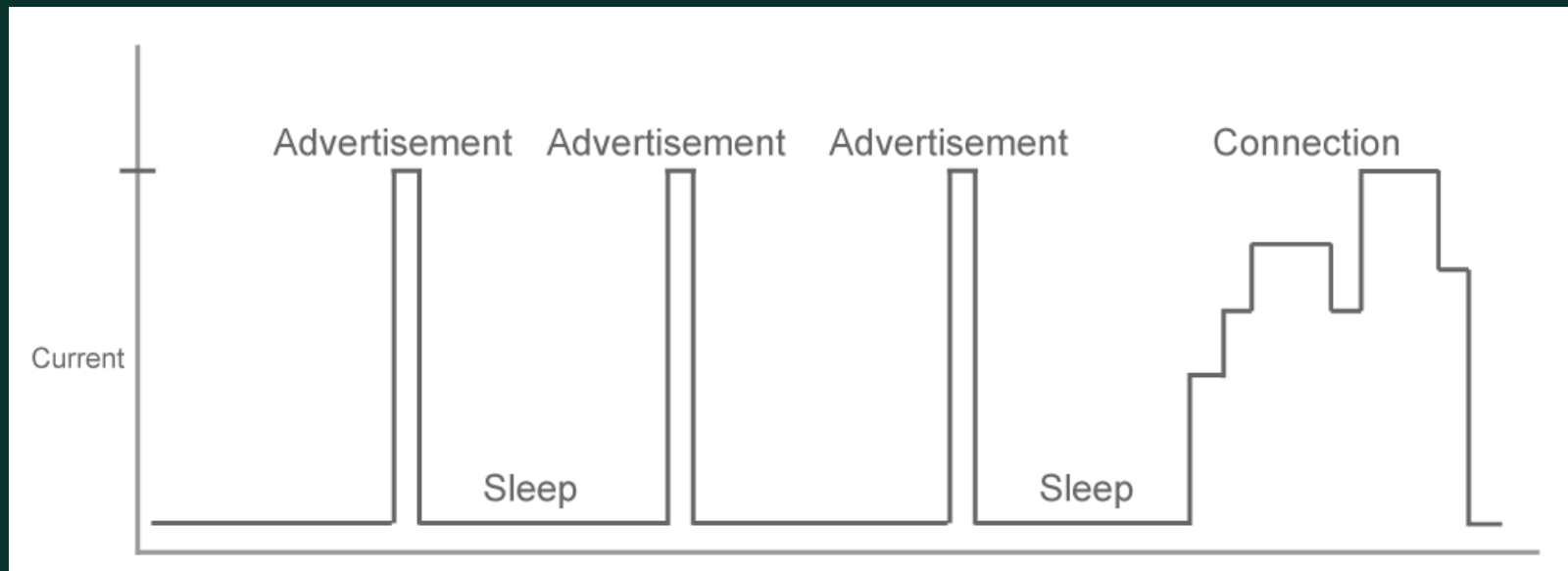
Fonte: developerhelp.microchip.com (adaptado)

Especificações de consumo de bateria

Especificações de consumo de bateria

- Alguns rádios BLE podem atingir 20 mA de consumo quando estão transmitindo (ou mais, caso a potência de transmissão seja aumentada);
- O consumo está relacionado ao ciclo de tarefas do dispositivo como anúncio, conexão, troca de canal, entre outros;

Consumo de energia do Bluetooth Low Energy em diferentes estágios.



Fonte: argenox.com

Especificações de consumo de bateria

- Em estado dormiente, o consumo fica em torno de $1,5 \mu A$, já que o rádio não está transmitindo;
- Um forma de reduzir o consumo de energia pelo rádio é aumentar o intervalo entre os anúncios;
- Com relação as tensões, há variação entre 1,8 V, 2,8 V e até 5 V.
- No quadro, a seguir, há uma comparação entre o consumo de energia e a potência de transmissão. O chip analisado é o nRF52832 da Nordic Semiconductor:

Especificações de consumo de bateria

Potência de saída	Consumo de corrente LDO	Consumo de corrente DC/DC
+4 dBm	16,6 mA	7,5 mA
0 dBm	11,6 mA	5,3 mA
-4 dBm	9,3 mA	4,2 mA
-8 dBm	8,4 mA	3,8 mA
-12 dBm	7,7 mA	3,6 mA
-16 dBm	7,3 mA	3,3 mA
-20 dBm	7,0 mA	3,2 mA
-40 dBm	5,9 mA	2,7 mA

Aplicações e valores de módulos

Aplicações e valores de módulos

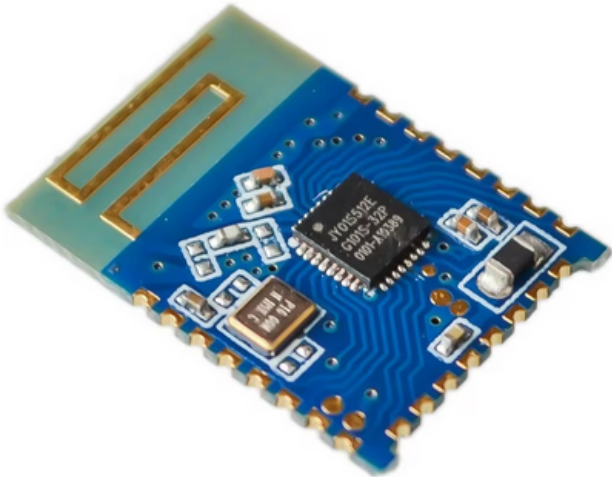
- Abaixo, há um quadro comparativo entre as tecnologias Bluetooth Classic e Bluetooth Low Energy:

Aplicação	Bluetooth BR/EDR	Bluetooth Low Energy
Transmissão de áudio	Suportado	Suportado
Aplicações de localização e determinação de direção, tais como: • Rastreamento de itens • Navegação em ambientes fechados	Não suportado	Suportado
Transmissão de dados em aplicações como: • Equipamentos médicos • Equipamentos esportivos • Acessórios e periféricos	Não suportado	Suportado
Aplicações para dispositivos de rede como: • Monitoramento de sistemas e serviços • Sistemas de automação • Sistemas de controle	Não suportado	Suportado

Aplicações e valores de módulos

- Com relação a valores de módulos, no site AliExpress é possível encontrar dispositivos com preço abaixo de 10 reais:

Módulos Bluetooth Low Energy disponível no site AliExpress.



R\$5,76 ~~R\$6,06~~ 5% desc.
+R\$2,62 estimados em imposto ⓘ

JDY-19 ultra-baixo consumo de energia módulo bluetooth 4.2 ble

★★★★★ 5.0 1 avaliação ⓘ 35 vendido

Fonte: aliexpress.com

Aplicações e valores de módulos

Módulos Bluetooth Low Energy disponível no site AliExpress.



R\$10,64

+R\$4,81 estimados em imposto ⓘ | 5% off extra

 [Cupom e Desconto](#) 

JDY-22 módulo ultra baixo da antena externa do módulo do ble do bluetooth-compatível com bluetooth do módulo da baixa potência 4.2 ultra-baixo

by  AEAk Official Store ( **4.7** | 10,000+ sold)

Fonte: aliexpress.com

Conclusão

Conclusão

- A tecnologia Bluetooth Low Energy criou a possibilidade de transmissão de dados a curta distância com baixo consumo de energia;
- Viabilizou a criação de periféricos alimentados por bateria e podem durar longos períodos sem a necessidade de recarga;
- A tecnologia é amplamente utilizada em dispositivos IoT, como rastreadores de atividades físicas, relógios inteligentes, *smartphones*, entre outros;
- As técnicas de espalhamento espectral e o algoritmo de salto de frequência, permitem a co-existência de vários dispositivos na mesma faixa de frequência;