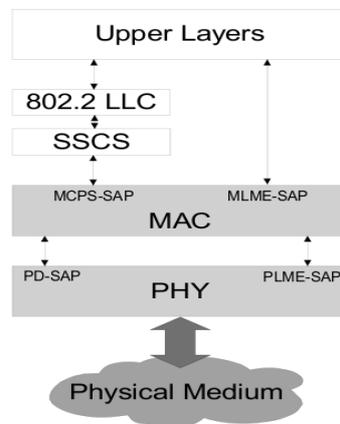
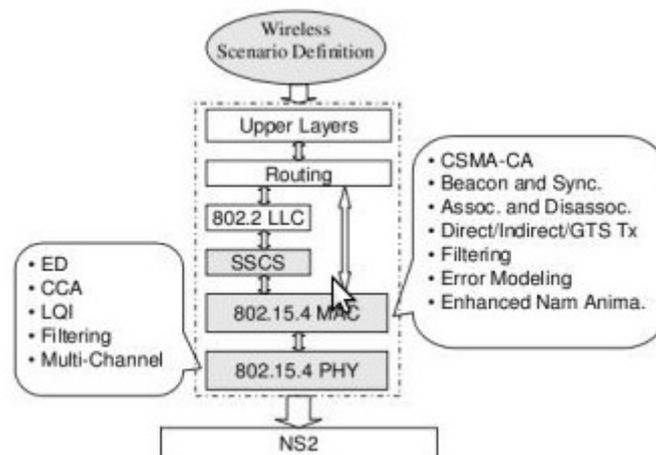


A Camada Física do Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 apresenta uma arquitetura de comunicação estruturada em camadas. A figura abaixo ilustra a arquitetura de um dispositivo LR-WPAN baseado neste padrão.



A camada física (PHY) provê uma interface entre a subcamada MAC e o canal do rádio, e oferece uma série de serviços e mecanismos de controle de nível físico essenciais para as camadas superiores da arquitetura (detalhados adiante). São definidas 14 primitivas de nível físico. A subcamada MAC provê controle coordenado de acesso ao canal físico para a realização das transferências de todos os tipos. São especificadas 35 primitivas no nível MAC. A camada SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer*) provê uma interface comum de acesso a todas as primitivas do nível MAC.



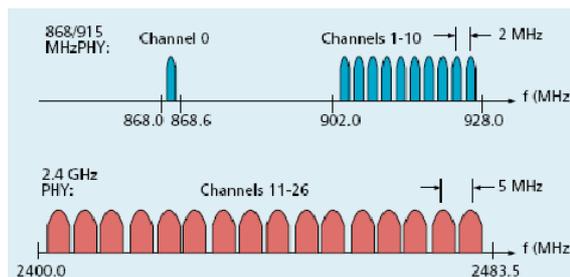
O serviço mais fundamental da camada física é a transmissão e a recepção de bits – os quais compõem uma PPDU (*PHY Protocol Data Unit*) – sobre um meio físico específico, qual seja, um canal de rádio operando a uma certa frequência. A camada física implementa também a troca de dados com a sub-camada MAC.

Bandas de Frequência

A camada física do padrão IEEE 802.15.4 trabalha sobre as bandas de frequência ISM (*Industrial Medical Scientific*) – que são frequências não licenciadas de rádio - e pode operar em 3 faixas de frequência: 2450 MHz (amplamente utilizada e adotada pelo Brasil), com 16 canais, 915 Mhz (apenas nos USA/Américas), com 10 canais, e 868 Mhz, com apenas 1 canal (padrão Europeu),

totalizando 27 canais que operam com três diferentes taxas de dados: 16 canais com uma taxa de dados de 250 Kbps em 2.4 GHz, 10 canais com uma taxa de dados de 40 Kbps na banda de 915 MHz e 1 canal com uma taxa de dados de 20 Kbps na banda de 868 Mhz.

RF Band	Frequency Range (MHz)	Data Rate (kbps)	Channel Number(s)	Geographical Area
868 MHz	868.3	20	0 (1 channel)	Europe
915 MHz	902-928	40	1-10 (10 channels)	America, Australia
2400 MHz	2405-2480	250	11-26 (16 channels)	Worldwide

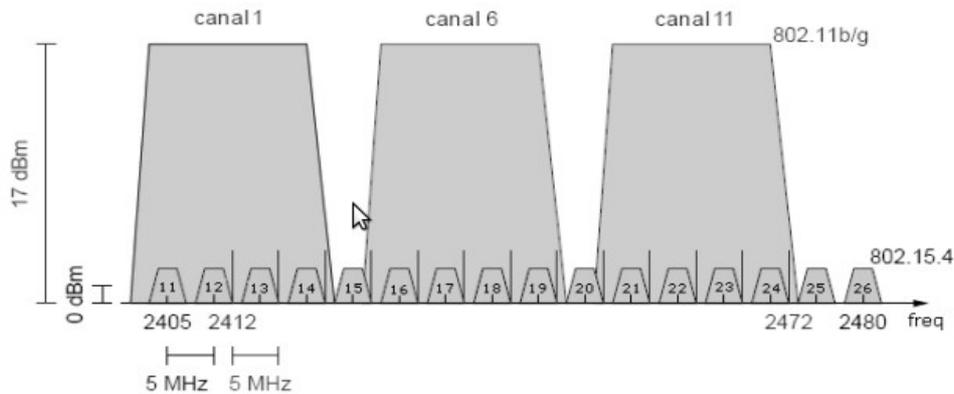


Observe que as bandas não licenciadas de RF não são as mesmas em todos os territórios do mundo, mas o padrão emprega três bandas possíveis; logo, pelo menos uma delas deve estar disponível em um determinado território.

	Channel	Center Frequency (MHz)	Availability
868 MHz Band	0	868.3	 Europe
915 MHz Band	1	906	 Americas
	2	908	
	3	910	
	4	912	
	5	914	
	6	916	
	7	918	
	8	920	
	9	922	
	10	924	
2.4 GHz Band	11	2405	 World Wide
	12	2410	
	13	2415	
	14	2420	
	15	2425	
	16	2430	
	17	2435	
	18	2440	
	19	2445	
	20	2450	
	21	2455	
	22	2460	
	23	2465	
	24	2470	
	25	2475	
	26	2480	

Observe também que a forma com que tais canais estão organizados permite a coexistência do padrão IEEE 802.15.4 com outros padrões, por exemplo, o IEEE 802.11, em um mesmo ambiente. Apesar do IEEE 802.11 utilizar uma porcentagem grande da faixa de frequência disponível, a utilização dos canais 15, 20, 25, 26 do IEEE 802.15.4 ainda é permitida. Em resumo, os canais

802.15.4 devem ser escolhidos com cuidado se já existe operando no local uma rede WiFi (802.11)



Comparadas à banda de 2,4 GHz, as bandas de frequência de 868 e 915-MHz oferecem algumas vantagens, como o menor número de usuários por área (possuem maior cobertura), menor interferência e menos de absorção e reflexão. Entretanto, a banda 2,4 GHz é muito mais amplamente adotada por um número de razões:

- Disponibilidade mundial para uso sem licença
- Maior taxa de dados (250 kbps) e mais canais
- Menor latência e menor “duty cycle”
- Menor consumo de energia (transmissão/recepção no estado *on* por um menor período de tempo devido à maior taxa de dados)
- Banda de RF mais comumente entendida e aceita pelo mercado (também usada pelos padrões 802.15.1/Bluetooth e IEEE 802.11/WiFi).

O alcance de uma transmissão de rádio é dependente do ambiente de operação, por exemplo, se *indoor* ou *outdoor*. Com um dispositivo padrão (em torno de 0 dBm de potência de saída), um intervalo de mais de 200 metros pode normalmente ser conseguido ao ar livre. Num edifício, este alcance pode ser reduzido devido aos efeitos da absorção, reflexão, difração e distorção de ondas causadas por paredes e outros objectos sólidos mas, tipicamente, um intervalo de 30 metros pode ser alcançado. Módulos de potências maiores (maiores do que a potência de saída 15 dBm) pode atingir uma gama de cinco vezes maior do que um módulo padrão. Além disso, o intervalo entre os dispositivos pode ser estendido empregando uma topologia que utiliza nodos intermédios na passagem de dados para um destino.

As três utilizam faixas de frequência utilizam como método de transmissão o *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, que reduz o consumo de energia devido à baixa potência utilizada na transmissão de dados. A faixa de 2.4 GHz apresenta modulação por mudança na fase da portadora do tipo *O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying)*, na qual um símbolo enviado representa 4 bits de dados. As outras duas faixas de frequência utilizam modulação do tipo *BPSK (Binary Phase Shift Keying)*, o tipo mais simples de PSK, onde cada símbolo representa 1 bit de dados. A tabela abaixo resume as diferenças entre as faixas de frequências possíveis para o IEEE 802.15.4.

Tabela 1 - Bandas de frequência e taxas de transferência da norma IEEE 802.15.4.

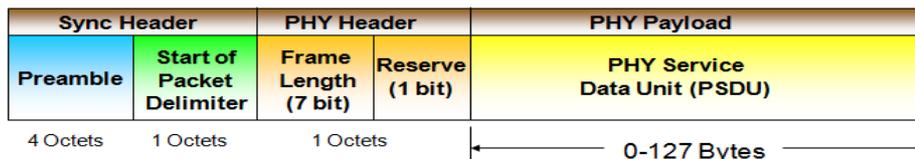
Banda de frequência (MHz)	Taxa de transferência (kbps)	Número de canais	Modulação
868	20	1	BPSK
915	40	10	BPSK
2450	250	16	O-QPSK

<APRESENTAR A MODULAÇÃO O-QPSK>

Estrutura do Quadro 802.15.4 na Camada Física

O formato da unidade de dados de nível físico (*PPDU – Physical Protocol Data Unit*) do IEEE 802.15.4 pode ter até 127 bytes de *payload* (sem os cabeçalhos). O cabeçalho de sincronismo (*Sync Header*) possui informações que permitem a sincronização do dispositivo com o pacote na recepção do mesmo: um *preâmbulo* de 32-bits e um byte delimitador de pacote (*SFD = 11100101*). O cabeçalho físico (*PHR – PHY Header*) contém a informação do tamanho do quadro, enquanto o *payload* possui os dados da camada de enlace.

O formato do PPDU é mostrado na figura a seguir:

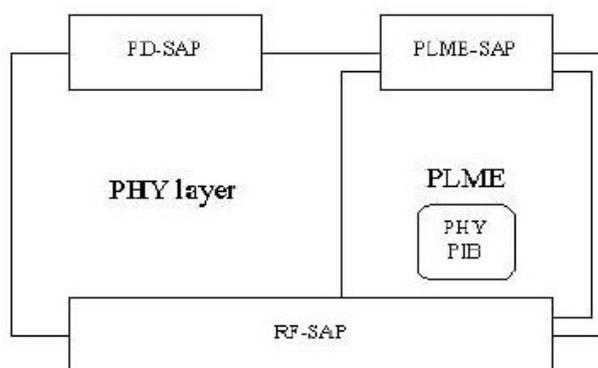


Serviços da Camada Física

As entidades da camada física oferecem basicamente dois tipos de serviços para a sub-camada MAC:

- *PHY Service Data*: fornece mecanismos para a transferência de dados de e para a sub-camada MAC;
- *PHY Management Services*: fornece mecanismos para controlar as configurações de rádio e outras funcionalidade a partir da sub-camada MAC (provê dados e serviços de gerência para as camadas superiores).

Os serviços são acessados através de dois SAP's (PD-SAP e PLME-SAP) e as informações utilizadas para gerenciar a camada são armazenadas em um banco de dados chamado de PIB (*PAN Information Base*).

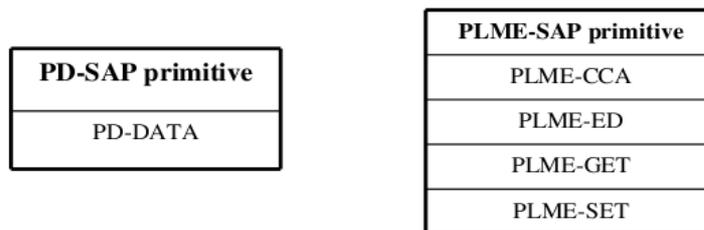


Conforme o modelo OSI, os serviços de camada física são requisitados pela sub-camada MAC através do uso das correspondentes primitivas de serviço. No caso do padrão IEEE 802.15.4, a camada MAC interage com a camada PHY por meio de: (i) primitivas de Serviços de Dados, providos por intermédio do PD-SAP (Physical Data – Service Access Point), e (ii) primitivas de Serviço de Gerência, providos pela entidade de gerência da camada (PLME) através do seu PLME-

SAP (Physical Layer Management Entity - Service Access Point).

Pelo PD-SAP é disponibilizada a primitiva PD-DATA, responsável pela efetiva troca de dados entre sub-camadas MAC pares. Pelo PLME-SAP são disponibilizadas as primitivas PLME-C, PLME-ED, PLME-GET/SET e PLME- TRXENABLE, onde:

- PLME-CCA – verifica a atividade no canal
- PLME-ED – realiza a detecção de energia
- PLME-GET / SET – escrita/leitura dos parâmetros da PIB
- PLME-TRX-ENABLE - ativa/desativa o transceptor de rádio



Como mencionado, faz parte também da camada física a PIB (*Physical PAN Information Base*), que é a base de informações necessárias para o correto funcionamento da camada e se encontra sob domínio do PLME.

Alguns dos atributos são mostrados na tabela a seguir:

Attribute	Identifier	Type	Range	Description
<i>phyCurrentChannel</i>	0 x 00	Integer	0–26	The RF channel to use for all following transmissions and receptions (see 6.1.2).
<i>phyChannelsSupported</i>	0 x 01	Bitmap	See description	The 5 most significant bits (MSBs) (b_{27}, \dots, b_{31}) of <i>phyChannelsSupported</i> shall be reserved and set to 0, and the 27 LSBs (b_0, b_1, \dots, b_{26}) shall indicate the status (1=available, 0=unavailable) for each of the 27 valid channels (b_k shall indicate the status of channel k as in 6.1.2).
<i>phyTransmitPower</i>	0 x 02	Bitmap	0 x 00–0xbf	The 2 MSBs represent the tolerance on the transmit power: 00 = ± 1 dB 01 = ± 3 dB 10 = ± 6 dB The 6 LSBs represent a signed integer in twos-complement format, corresponding to the nominal transmit power of the device in decibels relative to 1 mW. The lowest value of <i>phyTransmitPower</i> shall be interpreted as less than or equal to -32 dBm.
<i>phyCCAMode</i>	0 x 03	Integer	1–3	The CCA mode (see 6.7.9).

As seguintes funcionalidades são implementadas na camada física, algumas delas descritas abaixo:

- ativação e desativação do transceiver (rádio)
- seleção de frequência e troca de canal
- geração da frequência portadora e detecção de sinal
- (de)modulação e (de)codificação de bits
- transmissão e recepção de dados (*PHY Protocol Data Units - PPDU*) através do canal físico de rádio
- detecção de níveis de energia no canal (*ED - Energy Detection*)
- medição da qualidade do enlace (*LQI – Link Quality Indication*) para os pacotes recebidos
- verificação da ocupação do canal (*CCA - Clear Channel Assessment*) para gerenciamento de acesso ao canal via CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*).

Channel Management: Clear Channel Assessment (CCA)

Na transmissão de um pacote através da rede sem usar fatias garantidas de tempo (*GTS - Guaranteed Timeslots*) – vide adiante – o mecanismo CSMA/CA “unslotted” é implementado, visando minimizar o risco de uma colisão com outro pacote que está sendo transmitido no mesmo canal, ao mesmo tempo, por outro nó. O nó transmissor executa uma operação de *Clear Channel Assessment (CCA)*, em que primeiro escuta o canal para verificar se o canal já está ocupado. Ele não transmite o pacote se detectar alguma atividade do canal, mas tenta de novo mais tarde, depois de um período de *backoff* aleatório. A operação CCA é solicitada pela sub-camada MAC e é implementada pela camada física.

Channel Management: Channel Assignment

A camada física do IEEE 802.15.4 oferece facilidades para gerenciamento dos canais, por exemplo, a verificação da disponibilidade de um canal para transmissão e a proteção de canais de interferências de transmissões próximas.

Como mencionado anteriormente, uma rede IEEE 802.15.4 pode operar em três faixas de frequência de rádio possíveis (dependendo da área geográfica), centradas em 868 MHz, 915 MHz e 2400 MHz. Estas bandas têm 1, 10 e 16 canais, respectivamente. Esses 27 canais dessas faixas de frequência são numeradas de 0 a 26, com frequência crescente.

O IEEE 802.15.4 pode varrer (procurar) os canais de uma dada banda de frequência, e isso permite às camadas mais altas selecionar o canal apropriado. Três situações onde isso é necessário são:

1. Quando uma rede é configurada, um canal dentro da faixa de frequência relevante deve ser escolhido. Isto é feito pelo Coordenador da PAN. O IEEE 802.15.4 fornece uma funcionalidade de verificação de detecção de energia (*ED – Energy Detection*), que pode ser usada para selecionar o canal adequado (normalmente aquele mais silencioso).
2. Quando um novo dispositivo é introduzido na rede, ele tem de encontrar o canal que está sendo utilizado pela rede. Ao novo dispositivo é fornecido o PAN ID da rede e ele executa uma das seguintes ações:
 - *Varredura Ativa de Canal (Active Channel Scan)*, em que o dispositivo envia pacotes de *beacon requests* para ser detectado por um ou mais coordenadores que, enviam então um pacote de *beacon* em resposta;
 - *Varredura Passiva de Canal (Passive Channel Scan)*, somente em redes *beacon-enabled*, em que o dispositivo escuta por *beacons* periódicos transmitidos por um

coordenador (o coordenador da PAN ou, no caso de uma rede em árvore, um outro coordenador).

3. Quando um dispositivo torna-se órfão (isto é, perdeu a comunicação com seu coordenador), a fim dele se juntar novamente à rede, ele deve realizar uma operação de *Orphan Channel Scan*. Isso envolve o envio de um comando de notificação de órfão através de canais específicos, na esperança de que o seu coordenador irá detectar a transmissão e responder com um comando de realinhamento com coordenador (*Coordinator Realignment*).

Channel Management: Channel Rejection

Em bandas com mais de um canal (915 MHz e 2400 MHz), a fim de eliminar interferência de outras redes que operam em canais próximos, o IEEE 802.15.4 impõe um regime de rejeição de canal para canais adjacentes e canais alternados, isto é, a dois canais de distância.

Ao receber um sinal:

- Se um outro sinal no mesmo nível (0 dB de diferença) ou mais fraco for detectado em um canal adjacente, o sinal do canal adjacente deve ser rejeitado.
- Se outro sinal no máximo 30 dB mais forte é detectado em um canal alternado, o sinal do canal alternado deve ser rejeitado.

Receiver Energy Detection (ED)

A camada física do 802.15.4 inclui a funcionalidade de detecção de energia do canal atual, que pode ser usada pelas camadas mais elevadas do software para evitar a interferência entre as comunicações de rádio, isto é, para selecionar o melhor canal de frequência de inicialização e, sempre que possível, se adaptar a um ambiente de RF em mudança, selecionando um outro canal se o atual se apresentar problemático.

A medida da detecção de energia do canal (ED) é usada como parte do algoritmo de seleção de canal. Ela corresponde a uma estimativa da potência do sinal recebido dentro da largura de banda do canal. Nenhuma tentativa é feita para identificar ou decodificar os sinais no canal. O tempo ED deve ser igual a 8 períodos de símbolo.

O resultado ED é reportado como um inteiro de 8 bits que varia de 0x00 a 0xFF. O valor mínimo de ED deve indicar um valor de potência que é menos de 10 dB acima da sensibilidade do receptor. A faixa de potência gerada pelos valores de ED deve ser de, pelo menos, 40dB. Dentro desta gama, o mapeamento da potência recebida em decibéis em valores ED deve ser linear, com uma precisão de +/- 6dB.

OBS: 0 dBm (ou dBmw) equals 1 milliwatt. The decibel (dB) is a dimensionless unit, used for quantifying the ratio between two values, such as signal-to-noise ratio. A 3 dB increase represents roughly doubling the power, which means that 3 dBm equals roughly 2 mW. For a 3 dB decrease, the power is reduced by about one half, making -3dBm equal to about 0.5 milliwatt. To express an arbitrary power P in watts as x in dBm, or vice versa, the following equations may be used: $x = 10 \log P + 30$.

Standard specifies that each device shall be capable of transmitting at least 1 mW

Typical devices (1mW) are expected to cover a 10-20 m range

Standard requires a receiver sensitivity of -85 dBm, and the defined transmit power steps are -25 dBm, -15 dBm, -10 dBm, -7 dBm, -5 dBm, -3 dBm, -1 dBm and 0.

Link Quality Indication (LQI)

A medida LQI é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade do pacote recebido. Ao receber um recepção de um pacote, a camada física envia, na primitiva *PD-DATA.indication*, o comprimento da unidade de dados de serviço (PSDU), a própria PSDU e a qualidade do link (LQ). A medição LQI é uma caracterização da força e/ou da qualidade de um pacote recebido. A medição pode ser implementada usando a medida *ED*, uma estimativa da relação sinal/ruído ou uma combinação desses métodos. O uso da medida LQI (o que fazer com ela) é deixado para as camadas superiores. O valor do LQI deve ser relatado como um número inteiro que varia de 0x00 para 0xFF. Os valores mínimo e máximo devem estar associados com a menor e a maior qualidade dos sinais IEEE 802.15.4 detectáveis pelo receptor. Os valores de LQI devem estar uniformemente distribuídos entre estes dois limites.

Device Management: PAN Co-ordinator Selection

Todas as redes devem ter um e apenas um Coordenador da PAN. Este deve ser um dispositivo FFD (*Full Function Device*). A seleção do PAN coordenador é o primeiro passo na criação de uma rede baseada em IEEE 802.15.4.

O PAN Coordenador pode ser selecionado em um número de maneiras:

- Em algumas redes, pode haver apenas um dispositivo que é elegível para se tornar o coordenador da PAN, por exemplo, redes com apenas um FFD ou aquelas em que um determinado dispositivo foi previamente designado para ser o coordenador da PAN (por exemplo, o dispositivo que atua como gateway da rede).
- Em redes com mais do que um FFD, pode ser o caso de qualquer um dos FFDs poder atuar como o coordenador da PAN. Neste caso, o usuário pode ou não desejar pré-determinar qual o dispositivo se tornará o coordenador da PAN:
 - O usuário pode determinar o FFD que se tornará o coordenador da PAN através de alguma ação, por exemplo, pelo pressionamento de um botão.
 - O usuário pode não se importar com qual FFD que se tornará o coordenador da PAN e a escolha pode ser deixado ao acaso, por exemplo, todos os FFDs executam uma varredura ativa de canal e atribuem a responsabilidade de coordenador da PAN ao primeiro dispositivo que retornar um resultado negativo (ou seja, nenhum outro coordenador de PAN foi detectado naquela rede).

Uma vez que o coordenador da PAN tenha sido estabelecido, um PAN ID deve ser atribuído à rede. É possível decidir e corrigir o PAN ID com antecedência. No entanto, cuidado deve ser tomado já que o PAN ID deve ser diferente de qualquer outra rede que possa ser detectada na vizinhança. Normalmente, o PAN ID é atribuído pelo coordenador da PAN, tendo em conta os PAN IDs de quaisquer outros coordenadores de PAN que ele possa 'ouvir'.