

2

Aspectos Teóricos

Neste Capítulo serão mostrados todos os conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento do projeto. Primeiramente, na seção 2.1, será feita uma breve introdução às redes de sensores sem fio, incluindo suas classificações e características. A seguir serão apresentados alguns conceitos sobre a teoria dos grafos. Por fim na seção 2.3 é apresentado o problema do controle de topologia, alguns dos algoritmos já propostos para efetuar esse controle. A seguir na seção 2.4 são apresentadas algumas normas da IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Por fim na seção 2.5 são apresentadas as características de *hardware* do dispositivo (nó ou mote) para o qual foram conduzidas as nossas simulações.

2.1.

Redes de sensores sem fio

As redes de sensores sem fio (RSSF) podem ser vistas como uma subclasse das redes *ad-hoc* devido às semelhanças que elas possuem. No entanto é importante dizer que também existem diferenças entre elas, as principais sendo as restrições de processamento e energia que possuem as redes de sensores. Estas redes geralmente compreendem um grande número de nós sensores de pequenas dimensões e com capacidade de processar dados e transmiti-los mediante enlaces de radiofrequência, o uso mais comum dessas redes é ajudar no monitoramento de certos tipos de fenômenos. Algumas características das RSSF são: restrições de recursos, tráfego não balanceado devido ao fluxo de dados unidirecional, topologias dinâmicas e escalabilidade.

Estas redes geralmente são compostas por nós sem fio, *gateways* e uma estação base que se dedica a armazenar todos os dados coletados pelos sensores. Na Figura 2.1 pode ser observado um exemplo de uma rede de sensores sem fio, nesta os sensores trocam informações e logo procuram uma porta de enlace (*gateway*) para chegar à estação base, que como mencionado é responsável pela coleta e armazenamento das informações permitindo uma posterior análise dos dados.

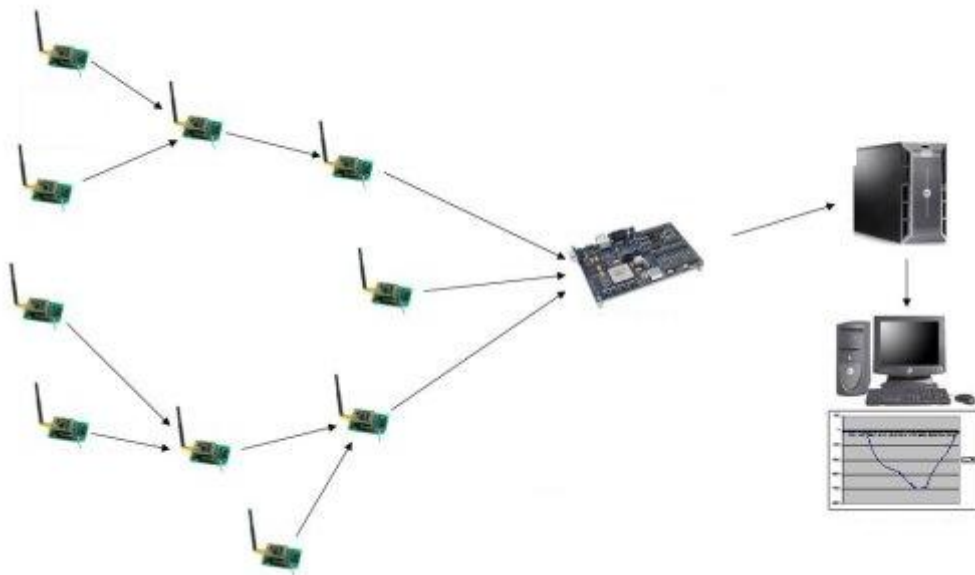


Figura 2.1: Arquitetura de uma rede de sensores

Os nós, também conhecidos como motes, são dispositivos eletrônicos capazes de captar informações do entorno no qual se encontram, processar as mesmas e transmiti-las a outro destino. O desenho destes é complexo já que têm que se ter em conta diversos fatores como o baixo consumo de energia, custos mínimos, uma transmissão de dados eficaz e de boa cobertura. Cada um dos dispositivos tem os seguintes componentes de *hardware*:

- **Processador:** é o componente que faz a interpretação dos dados para transmiti-los a outra estação, ele também garante o armazenamento dos dados na memória, em geral ele administra todas as operações do dispositivo.
- **Memória:** geralmente são usadas a memória do chip do microcontrolador e a memória flash, que permite que múltiplas posições da memória sejam escritas ou apagadas numa mesma operação através de impulsos elétricos.
- **Sensores:** é o componente que produz uma resposta a uma mudança do estado físico (temperatura, pressão, etc.).
- **Transmissor/Receptor de rádio:** trata-se de um dispositivo que permite realizar o envio e recepção de dados para se comunicar com outros dispositivos que se encontram na sua área de cobertura. Os nós utilizam a faixa ISM, que é uma faixa reservada internacionalmente para o uso não comercial de frequências

eletromagnéticas. Para fazer uso destas frequências não são necessárias licenças, desde que sejam respeitadas as regulamentações que limitam as potências de transmissão. Estas redes geralmente usam frequências de comunicação entre as faixas de 433MHz. e 2.4GHz.

- Alimentação: geralmente as fontes de alimentação dos sensores são baterias ou transformadores. se houver acesso a uma tomada de corrente. As baterias as vezes podem ser recarregáveis ou não, a maioria das vezes são feitas de níquel, zinco, cádmio ou lítio.

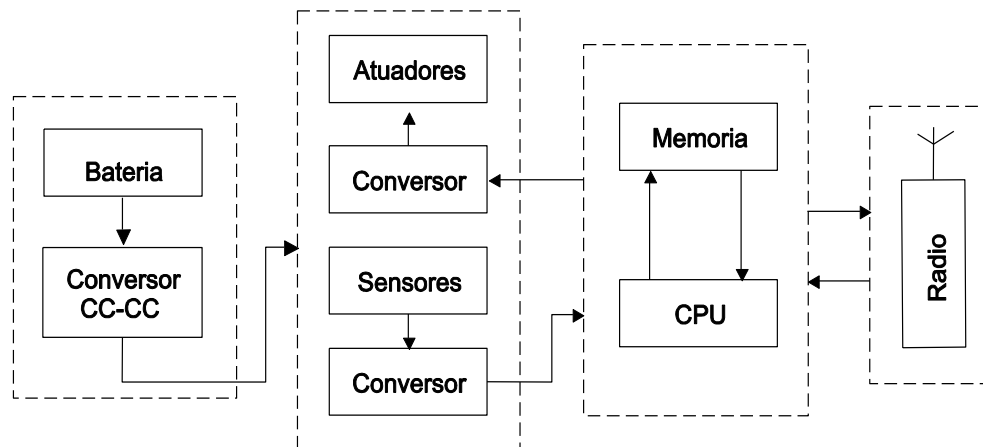


Figura 2.2: Estrutura de um nó sensor

Na Figura 2.2 é mostrado um exemplo de estrutura para um nó sensor, incluindo os distintos componentes aos quais nos referimos anteriormente. Podem ser observados quatro subsistemas, o primeiro que é a fonte de energia que inclui a bateria e um conversor que fornece tensão constante para os demais subsistemas do nó sensor, o segundo é o sistema de sensoriamento, a seguir encontra-se o subsistema computacional que compreende a memória e o processador, por ultimo o subsistema que nos permite ter uma comunicação sem fio. Podem existir nós com distintos componentes de hardware e a Figura 2.2 é ilustrativa.

2.2

Teoria dos grafos

Quando se faz referencia a um grafo está se falando de uma representação gráfica de um fenômeno, eles são muito uteis para representar problemas da vida real em distintas áreas, alguns exemplos são mapas de estradas, planejamento de projetos e redes. Desde um ponto de vista matemático, um grafo é uma coleção de pontos conectados por linhas. Os

pontos do grafo são conhecidos como vértices, mas também são chamadas de nós, enquanto as linhas que conectam esses vértices são chamadas de conexões, arcos, linhas ou arestas, na Figura 2.3 são apresentados vértices e arestas. O estudo destas estruturas tem por nome Teoria dos grafos, um resumo desta teoria pode ser achado em [22].

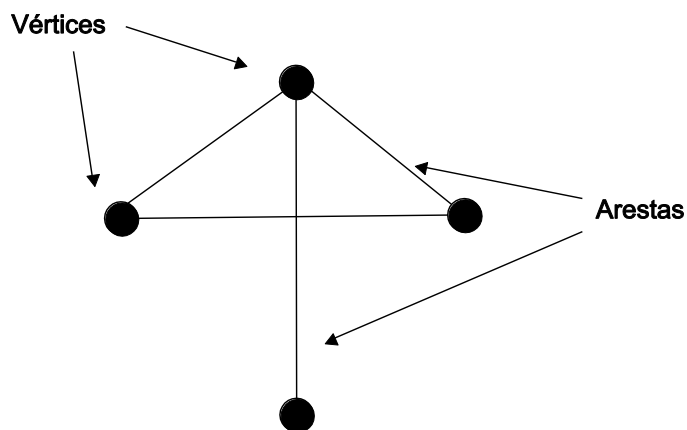


Figura 2.3: Nomenclatura dos grafos

Um grafo pode ser representado mediante um par ordenado $G = (V, E)$, sendo que V representa um conjunto de vértices e um conjunto $E \subset V \times V$ de arestas (*edges*).

Existe uma ampla variedade de grafos. O mais comum deles é aquele no qual no mínimo uma conexão pode conectar dois vértices, esses grafos tem por nome grafos simples. Se conexões múltiplas são permitidas entre os vértices, o grafo é conhecido como multi grafo. Outro exemplo é aquele que possui conexões múltiplas e iterações ou ciclos gráficos.

Na Figura 2.4 pode se observar os tipos de grafos descritos.

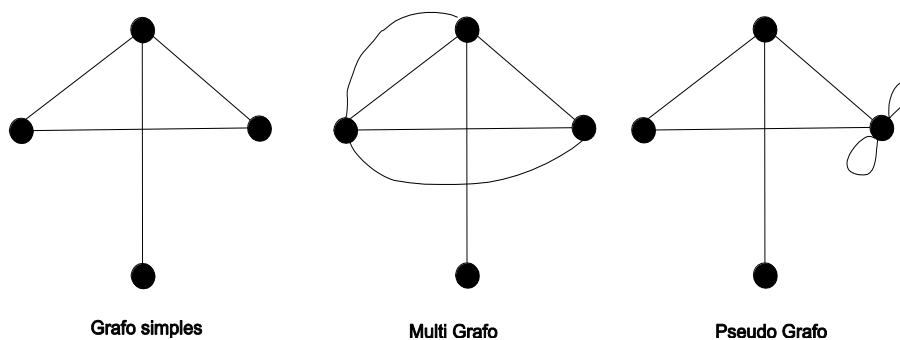


Figura 2.4: Tipos de grafos

As arestas dos grafos às vezes possuem direcionamento. Um grafo normal é aquele no qual suas ligações ou conexões não são direcionadas. Caso contrário se o grafo tem setas que indicam certo tipo de direcionamento em um dos pontos da conexão (vértices) ou em ambos, ele é conhecido como direcionado. O grafo dirigido é aquele que possui orientação a um único vértice. Na Figura 2.5 poderão ser observados os distintos conceitos descritos neste parágrafo.

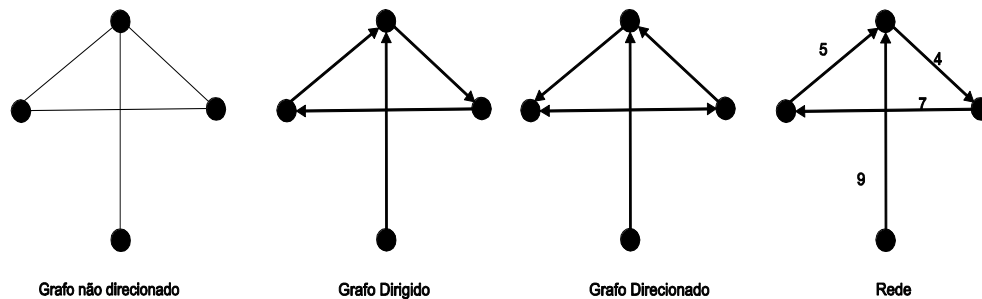


Figura 2.5: Classificação dos grafos

Geralmente cada conexão e recebe um peso ou valor que denota certo tipo métrica, a notação é a seguinte $w(e)$, a maioria das vezes esse peso é a distância euclidiana (é a distância geométrica entre dois pontos) entre os vértices que é então representada por $w(e) = d(x, y)$, onde x e y são dois pontos e d representa a distancia entre eles.

Algumas definições e propriedades que serão empregadas na continuação do trabalho:

- Um caminho ou trajetória de x a y é uma sequencia de vértices $v_0, v_1, \dots, v_n$ tal que $x=v_0$ e $y=v_n$, e possuam uma aresta $(v_{i-1}, v_i) \in E$ para cada $i \in \{1, \dots, n-1\}$.
- Um caminho x a y é chamado de simples se nenhum vértice é repetido nele.
- O comprimento de um caminho $v_0, v_1, \dots, v_n$ é definida como a soma dos pesos ao longo das conexoes que fazem parte deste trajeto.

$$\text{dist}(v_0, v_1, \dots, v_n) := \sum_{i=1}^{n-1} w(v_{i-1}, v_i)$$

- Um caminho $v_0 = x, v_1, \dots, v_{n-1} = y$ de x para y é chamado de caminho curto se não tem um caminho $v'_0 = x, v'_1, \dots, v'_{n-1} = y$ de x

para y que cumpra a equação a seguir,
 $dist(v'_0, v'_1, \dots, v'_n) < dist(v_0, v_1, \dots, v_n)$.

- A distância entre dois vértices x e y é definida como o comprimento do caminho mais curto de x para y . Se não existe nenhum caminho de x e y em G então $dist(x, y) := \infty$.
- Um ciclo é um caminho $v_0, v_1, \dots, v_r$ onde $v_0 = v_r$.
- Se $v_0, v_1, \dots, v_{r-1}$ forma um caminho simples então dizemos que $v_0, v_1, \dots, v_r$ é um ciclo simples.
- O grafo G está conectado, se para cada par $(x, y) \in V \times V$ um caminho de x para y existe.
- O grafo G é dito ser uma árvore se G está conectado e não possui ciclos.

2.2.1 Grafo Planar

Na teoria dos grafos, um grafo planar é aquele que faz parte do plano, pode ser representado de maneira que as ligações de comunicação não sejam interceptadas nos pontos finais da representação gráfica, em outras palavras nenhuma ligação (conexão) atravessa outra.

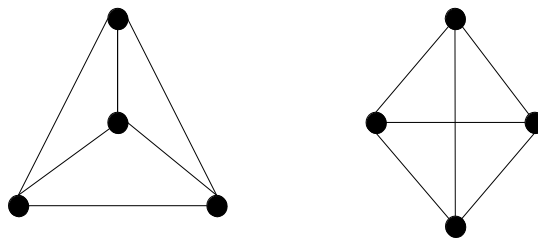


Figura 2.6: Exemplos de grafo planar

Na Figura 2.6 podem se observar dois grafos o da esquerda mostra uma representação planar do da direita, já que nele não se tem intercepções nas conexões, um grafo só será planar quando tiver um sub grafo que cumpra a condição já apresentada.

Já na Figura 2.7, figura da direita, ilustra o grafo planar de um cubo.

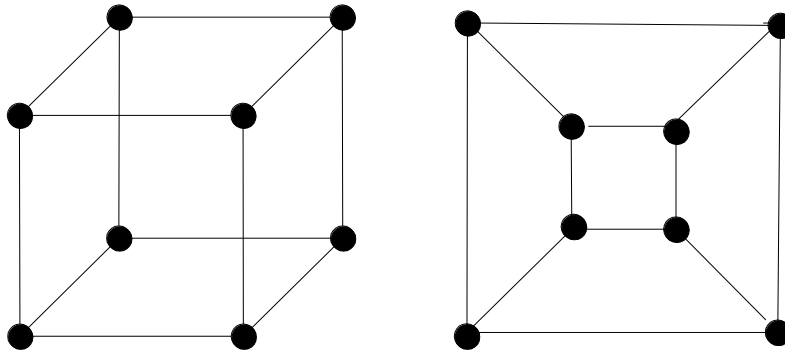


Figura 2.7: Grafo planar de um cubo

Existem diferentes possibilidades ou processos que nos permitem modelar a relação entre as ligações de comunicação da rede com as arestas de um grafo (grafo de comunicação). Um deles e o mais trabalhado nas pesquisas para modelar as redes de sensores sem fio num plano é o grafo do disco unitário (*unit disk graph*).

2.2.2 Grafo do disco unitário

Neste tipo de grafo, se modela a área de cobertura do sensor como um disco, o diâmetro dele é diretamente proporcional à potência de transmissão, nele existirá uma conexão ou aresta se entre dois nós a distância entre eles for menor ou igual ao alcance da potência de transmissão. Em outras palavras dois nós u e v serão conectados num grafo por uma aresta se e só se u se encontra no disco do v e vice-versa.

Na Figura 2.8 se tem um exemplo de um grafo do disco unitário

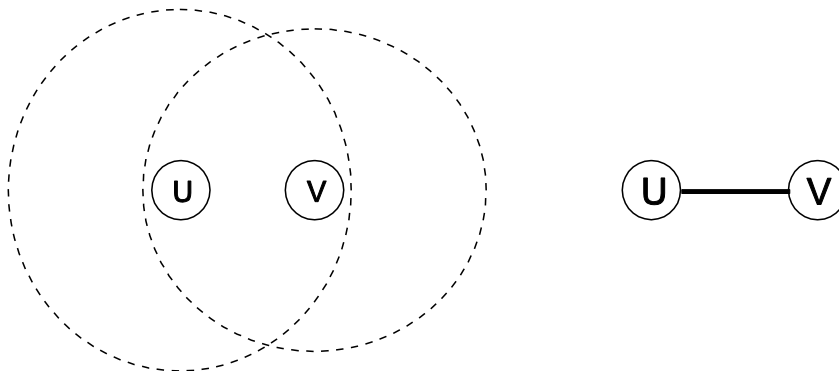


Figura 2.8: Comportamento do grafo do disco unitário

Em [23] são apresentados vários modelos para uma rede de sensores, inclusive o ilustrado na Figura 2.8.

2.3. Controle de topologia

A escolha da topologia numa rede de sensores sem fio é de muita importância já que desta depende a conectividade da rede e os custos de comunicação, os mesmos tem um grande impacto nos algoritmos de encaminhamento que posteriormente são aplicados na rede. As recentes pesquisas mostram que fazer controle da topologia é uma solução que permite ter sistemas com eficiência energética. É importante dizer que estes algoritmos tem um conjunto de restrições computacionais e energéticas. A transmissão por radio é a principal fonte de dissipação de energia, o radio consome em qualquer fase ou estado que se encontre (transmissão, recepção, ouvindo ou inativo), como afirmamos anteriormente os nós possuem energia limitada motivo pelo qual o consumo energético termina sendo a métrica de maior interesse.

A partir do grafo de comunicação pode se formular uma definição para o controle de topologia (TC), TC é o problema de calcular e manter a conectividade da topologia da rede entre todos os nós. Um grafo de topologia é $T' = (V', E')$ um subconjunto de um grafo de transmissão $T = (V, E)$ onde V é um conjunto de nós e E um conjunto de arestas entre eles, $E' \subseteq E$. Um grafo de transmissão é uma representação na qual se dois nós conseguem se enxergar então existe uma conexão (união entre dois pontos) entre eles. A gestão de topologia é um serviço de nível inferior estabelecido tipicamente na camada MAC ou sobre ela. O TC fornece uma visão diferente dos enfoques típicos já que restringe as comunicações ponto a ponto e prioriza as comunicações de múltiplos saltos, uma característica típica destes algoritmos é que eles fazem uma troca de mensagens (propagação de sinais) com seus respectivos vizinhos e depois fazem uso da informação obtida para escolher a melhor configuração possível.

Existe uma grande coleção de algoritmos para criar grafos de comunicação aplicados na área de redes de sensores, mas alguns deles não consideram a complexidade da propagação e recepção dos sinais.

Os protocolos de controle de topologia são concebidos para prolongar o tempo de vida da rede e prover conectividade em redes muito densas. Alguns dos conceitos que devem ser tidos em conta para o projeto de protocolos para o controle de topologia são os seguintes:

- Os protocolos devem garantir a conectividade mínima da rede, para que a rede não fique dividida.
- Os sensores devem ter capacidade de se configurar automaticamente para assim reagir às mudanças dinâmicas da rede.
- A escolha de nós redundantes devera ser feita em algoritmos que fazem uso de informação local.
- Deve se considerar os custos energéticos da rede.

Existem algumas estruturas geométricas utilizadas na criação deste tipo de algoritmos e muitas pesquisas têm trabalhado com estruturas planas que garantem a conectividade: MST (*minimum spanning tree*), LMST (*local minimum spanning tree*), RNG (*relative neighborhood graph*), GG (*Gabriel graph*), PDT (*partial delauney triangulation*) e DT (*Delauney Triangulation*). Estas estruturas possuem uma relação do tipo cadeia já que:

$$MST \subseteq LMST \subseteq RNG \subseteq GG \subseteq PDT \subseteq DT$$

Em outras palavras um grafo MST é um subgrafo de RNG que a sua vez é um subgrafo de DT, pelo qual DT sempre possuirá um subgrafo.

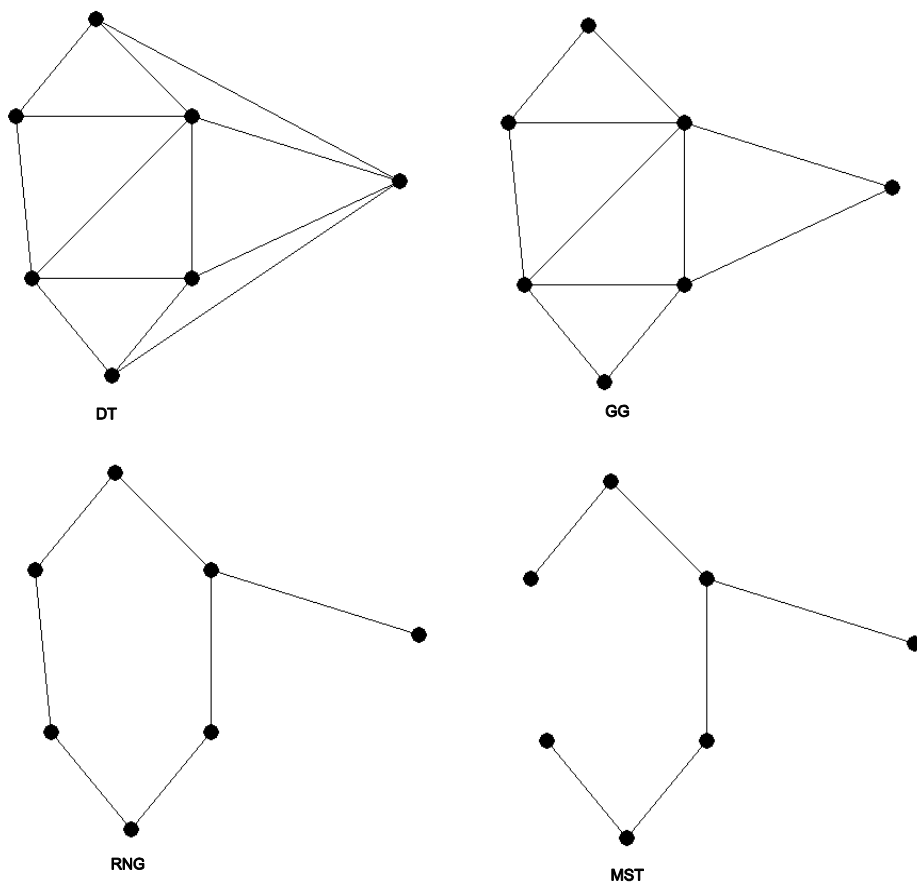


Figura 2.9: Exemplos de estruturas geométricas

Na Figura 2.9 pode se observar um exemplo de um conjunto de pontos convertidos em grafo com distintas estruturas geométricas, a figura nos permite observar claramente a relação de subgrafo existente entre estas estruturas geométricas. Dois delas serão apresentadas a continuação, o RNG e o MST.

2.3.1

Relative neighborhood graph

O RNG é um grafo sem direção que atende a seguinte regra: Uma conexão entre dois pontos u e v poderá ser feita no RNG se e somente se não é a aresta mais longa de um triângulo entres os pontos u , v e w , isto pode ser evidenciado na Figura 2.10.

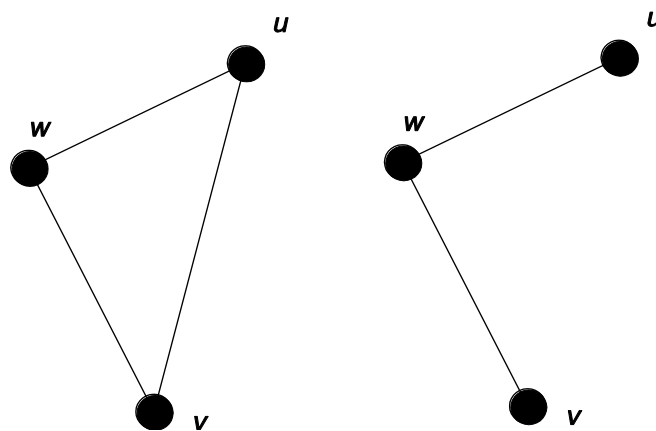


Figura 2.10: O RNG de um triângulo.

Na teoria pode se encontrar outra forma de definir o presente grafo, para isto se faz uso do conceito “*lune*”, é um conceito da geometria que se refere à interseção entre dois círculos, o nome vem da semelhança que o grafo acaba tendo com uma lua crescente, daqui para frente quando for preciso empregar esse conceito nos referiremos a ele como “Lua”. Na figura 2.11 é ilustrado o conceito de Lua.

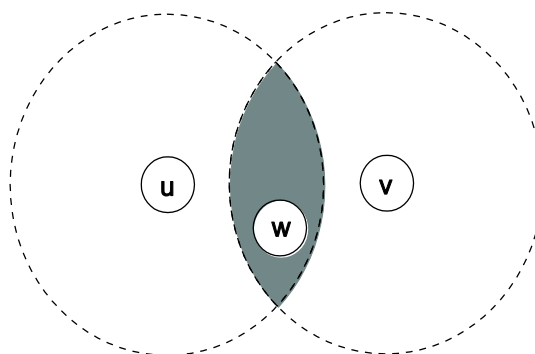


Figura 2.11: Conceito Lua

A aresta entre os pontos u e v estará no grafo se e somente se a Lua não tem outro nó no seu interior. Na Figura 2.11 existe um ponto na lua pelo qual a aresta entre u e v não existira.

Por ultimo será apresentada a definição clássica do RNG que é a seguinte: “O RNG de um conjunto finito de pontos V , e representado como $\text{RNG}(V)$ e é um grafo com um conjunto de vértices V e um conjunto de arestas $\text{RNG}(V)$ entres os pares de pontos (u,v) , $u \in V$ e $v \in V$, onde $\delta(u,v) \leq \max_{w \in V} [\delta(u,w), \delta(v,w)]$ sendo que δ indica a distancia entres os pontos u e v [13].

O conceito de Lua pode se definir da seguinte maneira:

$$\Lambda_{u,v} = B(u, \delta(u,v)) \cap B(v, \delta(u,v)) \rightarrow (u,v) \in E \text{ Só se } \Lambda_{u,v} \cap V = 0$$

$$\Lambda_{u,v} \cap V = 0$$

Onde $\Lambda_{u,v}$ é a lua entre os pontos u e v , e B representa um disco ou esfera com centro em u e raio δ .

2.3.2

Minimum Spanning Tree

Um MST é o primeiro elemento da cadeia da relação destas estruturas, portanto ele é um subgrafo de qualquer um dos outros grafos. O MST é subgrafo de qualquer grafo de comunicação que se encontre conectado e também conhecido como arvore devido à forma na qual ele conecta os pontos. Uma forma de criar um MST e também o mais clássico [24] é ordenar todas as arestas por seus comprimentos, cada uma das arestas é testada (primeiramente as mais curtas e depois as mais longas, nessa ordem) para a sua inclusão na arvore, a aresta só é adicionada ao grafo se não cria um ciclo.. Na Figura 2.12 são apresentados dois exemplos de ciclos.

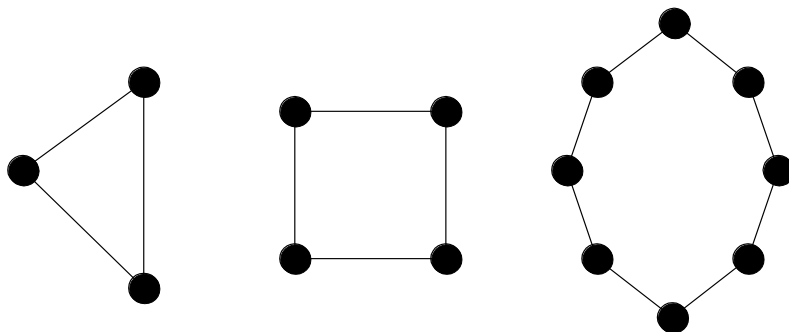


Figura 2.12: Exemplos de formação de ciclos

É importante dizer que podem existir configurações de pontos que tenham varias arestas com o mesmo comprimento, nesse caso existe mais de uma MST.

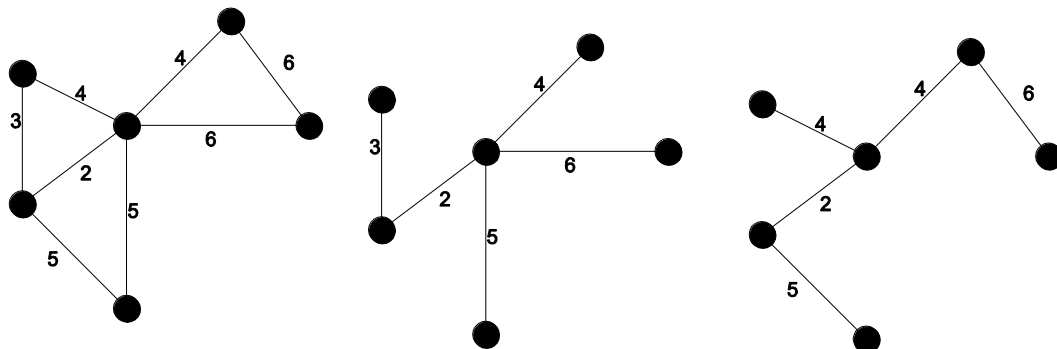


Figura 2.13: Exemplo de mais de um MST num grafo

Na Figura 2.13, a esquerda pode se observar um grafo conectado com suas distintas conexões e seus respectivos comprimentos, os dois seguintes grafos mostram a obtenção de duas diferentes topologias mediante o MST, isto para uma mesma configuração.

2.4

Padrões e Tecnologias

Nesta seção serão apresentados dois padrões do *IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)* para as comunicações sem fio, a saber, IEEE 802.11 e o IEEE 802.15., primeiramente se fará uma breve resenha do primeiro para posteriores comparações com o IEEE 802.15 no qual se baseia nosso trabalho.

O padrão IEEE 802.11 [25] é um padrão amplamente conhecido para as redes locais sem fio, ele define as características da camada física (PHY) e da camada de controle de acesso ao meio (MAC) e esta orientado a aplicações que precisam de uma alta taxa de transmissão, para conseguir realizar transferências de dados ou prover acesso a internet. Este padrão é mais bem conhecido como *Wi-Fi (wireless fidelity)*, e possui uma série de variações, só para mencionar alguns temos o 802.11a, padrão para frequências que variam entre 5 e 6 GHz como uma taxa máxima de transmissão de 54 Mbps, outro é o 802.11b que trabalha com frequências de 2.4GHz e com uma taxa de 11 Mbps, Em uma banda livre, também esta o 802.11n com frequências entre 2.4 GHz e os 5.8GHz com uma taxa de transmissão de 248Mbps e alcances de até 160 metros. Na Figura 2.14 pode se ver mais alguns padrões da família 802.11.

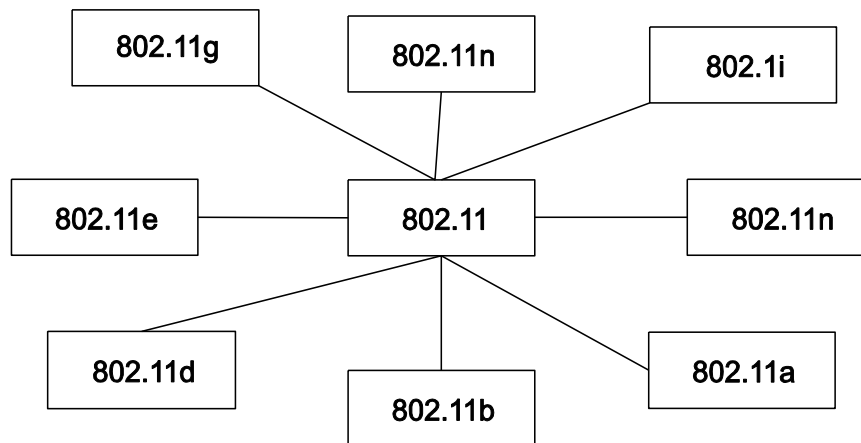


Figura 2.14: Família de padrões do IEEE 802.11

A continuação será apresentado o padrão 802.15 da IEEE, norma na qual se baseia a tecnologia usada no projeto, e que também é conhecida por *Zigbee*.

2.4.1 IEEE 802.15

Na atualidade quase todos os dispositivos eletrônicos (*notebooks*, *smartphones*, *tablets*, e uma série de equipamentos para telemedicina entre outros) aumentaram a sua capacidade de processamento de dados e sua capacidade de armazenamento, isto originou que estes dispositivos precisem de comunicações constantes entre eles para compartilhar dados e serviços entre si criando assim uma rede pessoal de um único usuário, o padrão IEEE 802.15 é uma tecnologia de rede para este cenário. .

O 802.15 é um padrão para as redes pessoais sem fio (WPAN, *Wireless Personal Area Network*), em poucas palavras uma WPAN é uma rede na qual se tem vários dispositivos conectados numa rede sem fio com enlaces de pequeno alcance.. Como a potência de transmissão dos dispositivos é baixa uma WPAN é projetada para baixas taxas de transferências, pequenas distancias e baixos custos, aqui se encontrando a maior diferença com seu primo o IEEE 802.11 já que ele trabalha com potências, distancias e velocidades maiores.

Este padrão possui varias extensões, as mais populares e utilizadas são as exibidas na Figura 2.15. Na referencia [26] foi feito um estudo comparativo entre elas salientando as suas principais características

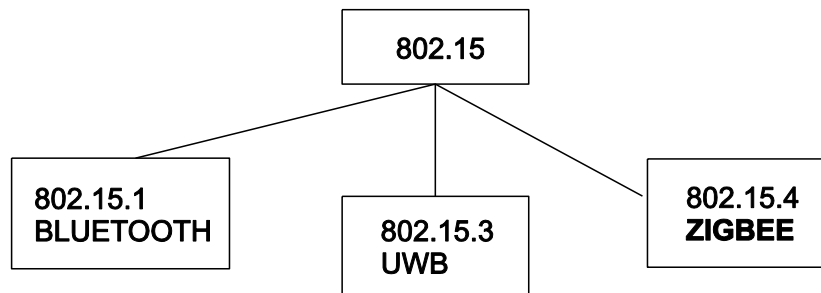


Figura 2.15: Família de padrões 802.15

Em passado recente, o *bluetooth* [27] tornou-se o mais popular podendo tecnologias que seguem esse padrão ser encontradas em telefones, teclados e câmaras digitais entre outros, ele foi padronizado no ano 2002 e o principal objetivo do padrão assim como da tecnologia é não precisar de cabos para ligar dispositivos próximos uns dos outros. Existem três tipos de dispositivos para esta tecnologia, eles são definidos pelo alcance que o dispositivo consegue ter, assim se tem um que alcança um metro, outro que alcança no máximo dez metros e a última classe consegue se comunicar com um dispositivo até a cem metros de distância. Uma das características do 802.15.1 é que ele cria WPANs com uma configuração *ad-hoc*, a partir do momento que um dispositivo acha outro é formada uma ligação imediatamente. Em [28] é apresentada uma excelente discussão sobre esta tecnologia.

O UWB tem um enfoque bem diferente já que as velocidades que ele utiliza permitem ter aplicações multimedia [29,30], essa é a característica mais forte da tecnologia, mas o ponto fraco é o alto consumo energético para atingir seus objetivos. Ele foi criado inicialmente para comunicações militares seguras, já na atualidade ele é visto como um meio de transmissão de alta velocidade que permite substituir barramentos seriais de alta velocidade, como ocorre com o USB 2.0. Em [31] pode ser encontrada a descrição da norma 802.15.3 da IEEE.

Na seguinte seção será descrito o *Zigbee*, tecnologia compatível com o dispositivo de *hardware* simulado no presente trabalho, o dispositivo é apresentado na seção 2.5.

Zigbee

O *Zigbee* nasceu para atender os requisitos que as WSN e os sistemas de controle apresentam (baixa latência, baixo consumo energético e grandes quantidades de dispositivos) [32] e implementam a norma 802.15.4 da IEEE [33]. Ele foi desenvolvido para operar numa banda de frequências que não requer de licença para funcionamento, na Tabela 2.1 pode se observar as distintas faixas

de frequência que ele pode utilizar. Os dispositivos desta tecnologia conseguem transmitir informações a longas distancias mediante dispositivos intermediários, desta forma eles criam uma rede *mesh*. A rede *MESH*, tipo de rede na qual cada nó além de ser responsável pelas suas próprias informações ele serve como um tipo de repetidor/encaminhador já que propaga a mensagem de outro nó na rede. Isto permite que numa rede se tenham múltiplos caminhos para enviar informação entre um nó e outro.

Frequência	Modulação	Taxa de transmissão	Canais de comunicação
868 MHz	BPSK	20 Kbps	1 canal
915 MHz	BPSK	40 Kbps	10 canais
2.4 GHz	O-QPSK	250 Kbps	16 canais

Tabela 2.1: Características do Zigbee

As redes *Zigbee* se caracterizam por terem baixos custos de complexidade e de consumo energético, baixas taxas de transferência e por oferecer uma boa imunidade contra interferências [34].

A tecnologia Zigbee consegue operar em distintas topologias, a saber: malha, estrela ou árvore. Na Figura 2.16 pode são mostrados exemplos das distintas topologias. Primeiramente na Figura 2.16.a se observa uma clássica topologia em estrela na qual se tem um nó fonte ou raiz com o qual se comunicam todos os dispositivos da rede, na figura ao centro 2.16.b, pode se ver uma topologia em malha, ela permite ter vários caminhos para comunicação entre dois terminais, por ultimo em 2.16.c pode se observar uma topologia do tipo arvore a mesma conta com distintos tipos de níveis ou hierarquias.

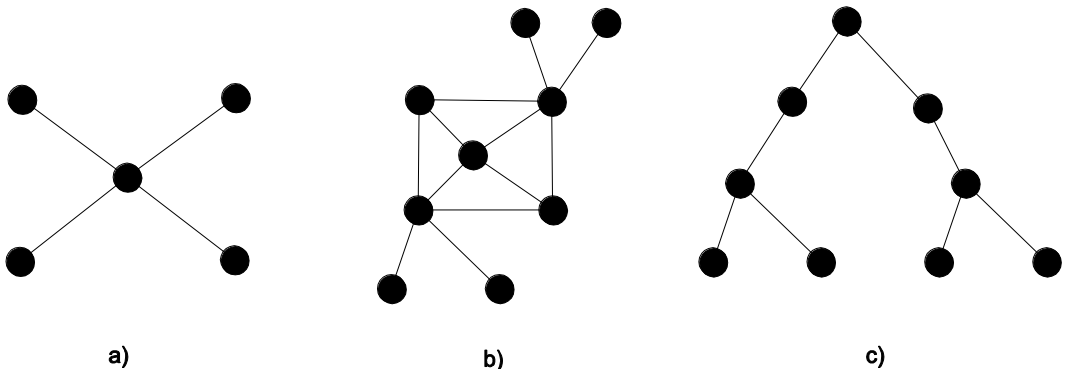


Figura 2.16: Topologias compatíveis com Zigbee

É importante dizer que o Zigbee possui dois modos de operação o *beaconing* e o *non beaconing*. No primeiro os nós que fazem as funções de encaminhamento transmitem uma mensagem de sinalização para achar os restantes nós da rede, assim estes outros nós só precisaram estar ativos no

momento da sinalização. Com isso vários componentes da rede permanecem em modo de espera, prolongando a vida das baterias. No segundo modo de operação, os receptores dos dispositivos ficam ativos o tempo todo.

O *Zigbee* é uma tecnologia flexível que atende os requisitos de baixo custo energético, de complexidade e de taxa de transferência, pelo qual se adéqua quase perfeitamente ao mundo das redes de sensores sem fio.

Por ultimo na Figura 2.17 são apresentadas algumas áreas nas quais o *Zigbee* possui aplicações.

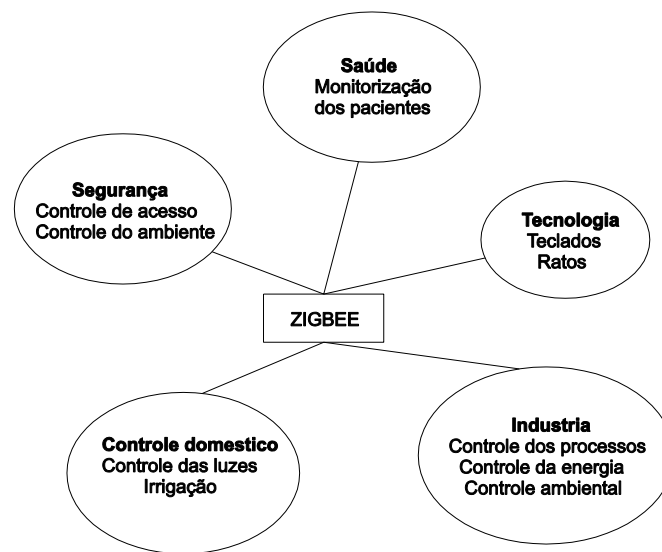


Figura 2.17: Aplicações do Zigbee

2.5 MicaZ

Como foi apresentado anteriormente um nó (ou mote) de redes de sensores sem fio é composto por uma unidade de processamento, memória, transceptor de radiofrequência e os sensores, portanto se precisa de um dispositivo que contenha todas estas unidades de hardware, a empresa *Crossbow Technology Inc.* tem desenvolvido uma série de dispositivos de hardware para sensores, uma delas é o Micaz, que também é conhecido como MPR2400, ele se caracteriza por trabalhar com uma frequência de 2.4GHz e pela compatibilidade com o padrão 802.15.4 o qual já foi amostrado na seção anterior, em [35] pode se achar as características que o dispositivo possui. Na Figura 2.18 um chip Micaz pode ser observado.



Figura 2.18: Aspecto físico do Micaz

Ele está composto por um micro processador ATmega128L [36], uma memória flash de 512 kb e um transceptor CC2420 (fabricado pela *Texas Instruments*) que segue o protocolo de comunicação *Zigbee* [37]. Na Figura 2.19 pode se observar um esquema de funcionamento deste mote.

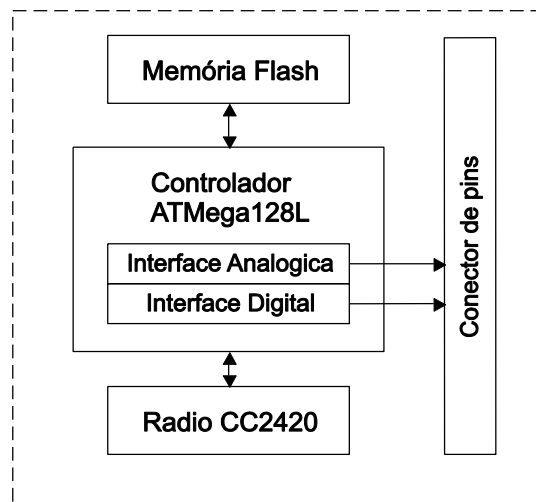


Figura 2.19: Descrição de funcionamento de um Micaz

Na seguinte seção serão detalhadas as características mais importantes deste transceptor ou seja aquelas importantes para os objetivos deste trabalho.

2.5.1 CC2420

O CC2420 é um chip de radio ou transceptor de radiofrequência que trabalha no espectro de 2.4GHz. da ISM (*Industrial Scientific and Medical radio band*) e usa o protocolo de acesso ao meio descrito na norma 802.15.4 da IEEE. Ele foi projetado especificamente para atender os requisitos de aplicações de redes de sensores sem fio que sejam de baixa potência, adotando o conceito de espalhamento espectral e modulação O-QPSK para assim prover uma taxa de transferência de até 250kbps. O chip ainda permite o uso de cifragem e duas métricas que são de nosso interesse já que indicam a qualidade do sinal, o RSSI

(indicador da intensidade do sinal recebida) e o LQI (indicador de qualidade da conexão). Por ultimo ele permite trabalhar com distintos níveis de potência de transmissão. A seguir serão apresentadas estas características que nos permitem trabalhar na eficácia da rede serão apresentadas com maior detalhe.

Potência de Transmissão

Embora o projeto destes dispositivos já proporciona um baixo consumo energético, poder configurar as potências de transmissão em distintos níveis é muito proveitoso já que esta característica tem relação direta com o tempo de vida dos dispositivos. Um maior tempo de vida nos permite ter aplicações de maior complexidade. Já a possibilidade de ajustar o nível de potência permite que os nós gerenciem dinamicamente os seus recursos energéticos.

O chip apresenta oito níveis de potência (adimensionais), de acordo com a tabela 2.2 onde também é indicado o valor estimado do consumo de corrente para cada um dos níveis.

Potência de transmissão (chip)	Potência de transmissão [dBm]	Consumo de corrente [mA]
31	0	17.4
27	-1	16.5
23	-3	15.2
19	-5	13.9
15	-7	12.5
11	-10	11.2
7	-15	9.9
3	-25	8.5

Tabela 2.2: Potências Variáveis do CC2420

Received Signal Strength Indicator (RSSI)

O RSSI é uma medida de intensidade do sinal de radio recebido. O CC2420 fornece um valor digital para esse parâmetro que é obtido através de um registro (RSSI_VAL) de 8 bits [37]. Com este valor pode ser determinada a potência recebida no chip do radio fazendo uso da seguinte equação:

$$P = \text{RSSI_VAL} + \text{RSSI_OFFSET} \text{ [dBm]}$$

Onde o RSSI_OFFSET é aproximadamente -45 dBm para o CC2420. É importante lembrar que o valor do RSSI_VAL é constantemente calculado e

atualizado para cada um dos símbolos. Assim o RSSI nos permite saber se o sinal recebido é fraco ou robusto mediante uma comparação com a sensibilidade do receptor, que é definida como sendo o sinal mínimo que o receptor consegue receber com uma taxa de erro aceitável. Quando o emissor distante é deslocado para um local mais próximo do receptor, a força do sinal recebido aumenta e portanto o seu RSSI também aumenta. Existe assim uma relação diretamente proporcional entre o RSSI e a distancia entre emissor e receptor. A medição da intensidade do sinal recebido é um dos métodos que permite determinar a qualidade de um enlace. A folha de dados do CC2420 [37] indica os valores relevantes para o funcionamento do equipamento e que são reproduzidos na tabela 2.3.

Parâmetro	Valor	Unidades
Valores do RSSI	Entre -100 a 0	dBm
Sensibilidade do receptor	-95	dBm
Precisão do RSSI lido	± 6	dB

Tabela 2.3: Características RSSI

Link Quality Indicator

O indicador de qualidade do enlace é à medida que nos permite caracterizar a confiabilidade do pacote recebido. Ele indica um valor entre 0 e 255 sendo que esses valores extremos representam a qualidade mínima do quadro e a máxima, respectivamente. Esta métrica foi incluída no protocolo de comunicação *Zigbee* e é fornecido pelo CC2420.

Para obter esse valor o chip CC2420 faz uso da sequencia de verificação do quadro FCS (*Frame Check Sequence*), que emprega dois bytes de redundância adicionados em cada quadro no transmissor permitindo detectar erros que ocorrem durante a transmissão. Na Figura 2.20 é apresentado o formato de um quadro no padrão IEEE 802.15.4, Incluindo o tamanho de cada campo (*slot*) de informação e também de controle, em bytes, incluindo o campo FCS.

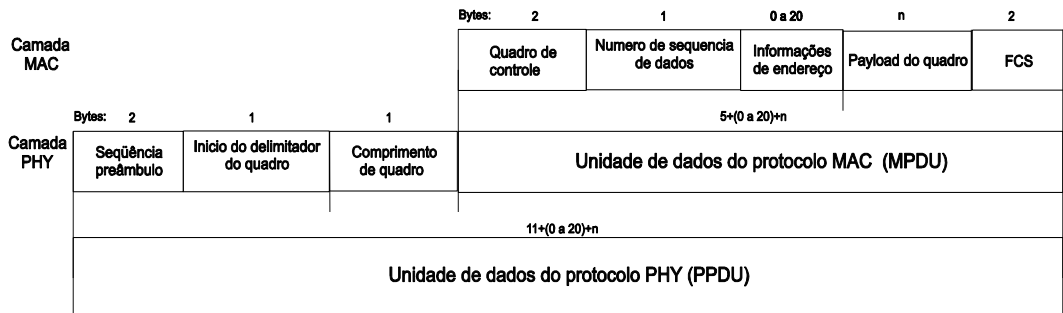


Figura 2.20: Quadro do 802.15.4

Na parte da transmissão o FCS é anexado na posição correta definida pela largura da banda, já no momento da recepção esses dois bytes são empregados para verificar a correção dos quadros recebidos. O usuário só esta interessado em saber se o quadro foi recebido corretamente ou não, não interessando os detalhes da operação de verificação realizada. Por isso o CC2420 reescreve os dois bytes usados pelo FCS e os preenche com o valor do RSSI (1 byte) , o CRC (1 bit para detectar erros) e uma correlação que será especificada a seguir (7 bits). Com esses dois bytes o chip consegue obter a relação apresentada no começo da Seção, este processo pode ser evidenciado na Figura 2.21.

A correlação que o chip consegue obter pode ser vista como o CER (a taxa de erro de chip). A recepção basea-se em correlatar a sequencia dos chips recebidos com os dezesseis possíveis símbolos.

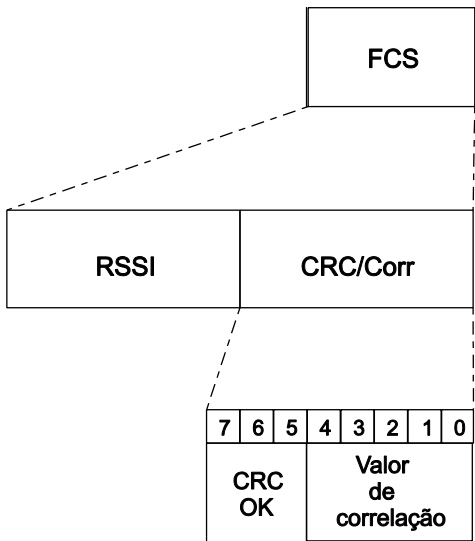


Figura 2.21: Uso dos dois bytes do FCS

O valor da correlação tem relação direta com o PER (*Packet Error Ratio*), uma correlação baixa indica um canal ruim e um valor alto do PER, pelo qual é por isso que a correlação ou LQI é visto como uma razão de erro do chip.

Alguns estudos falam que se precisa de um LQI maior a noventa para garantir uma recepção satisfatória.