

# Soluções de Localização

## Introdução

A solução mais simples para o problema de localização é conseguida pela triangulação entre pontos de coordenadas definidas e o objecto que se pretende localizar. É evidente que a precisão desta localização não implica um posicionamento global rigoroso, embora tenha de ser suficientemente preciso para permitir distinguir objectos no mesmo espaço, bem como a sua posição aproximada, de modo a que quem os pretenda localizar saiba, sem ambiguidades, onde eles se encontram dentro do espaço de busca.

De um ponto de vista de arquitectura do sistema, existem várias arquitecturas, que se configuram como alternativas viáveis ao esquema de localização. Estas são discutidas seguidamente.

## Nós Fixos ou âncoras

Nesta solução, existe um conjunto de nós fixos, também designados por âncoras na perspectiva do posicionamento, que emitem *beacons* (sinais periódicos com identificação ou informação de posicionamento do emissor) detectados pelos nós a localizar e que lhes permitem determinar a sua posição; esta posição será transmitida aos nós fixos (coincidentes com os *beacons*) que a retransmitirá até um nó central. Esta arquitectura está ilustrada na Fig. 1.

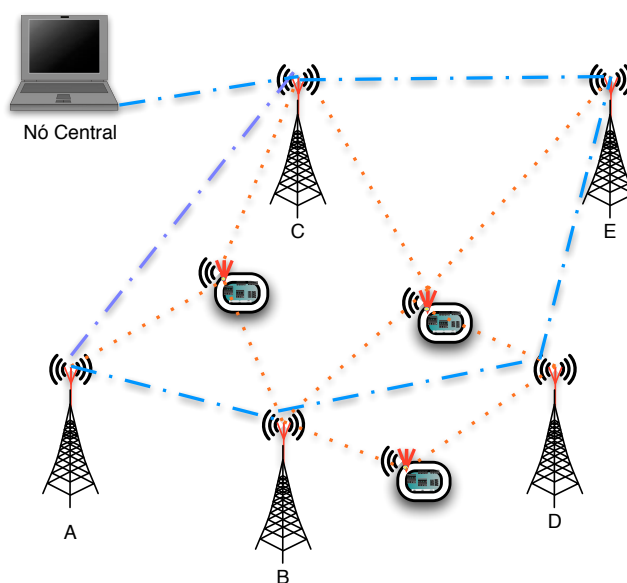


Fig. 1 - Arquitectura baseada em âncoras

As âncoras (representados na figura como torres ou postes) comunicam directamente com um nó central através de ligações com, ou sem, fios, ou indirectamente com aquele, através de um esquema *multihop* (ou multiponto se forem usados cabos). Os nós detectam os *beacons* emitidos pelos nós fixos e calculam a sua posição à custa de um algoritmo de triangulação (multilateração para ser mais preciso), a partir das coordenadas enviadas no *beacon*. Como este algoritmo envolve a resolução de um sistema de equações, que pode ser computacionalmente pesado, pode considerar-se a hipótese do cálculo da posição dos nós a localizar ser feita nos nós fixos, ou até no nó central, mediante a transmissão das medidas de distância efectuadas pelos nós. Neste caso, um nó limita-se a medir a sua distância às âncoras vizinhas.

Há variantes deste sistema, nomeadamente no que concerne à determinação da distância dos nós às âncoras. De facto, se o número de âncoras for suficiente grande de modo a criar uma “grelha” de localização numa dada área, e.g. um parque de estacionamento, é possível determinar se um objecto está dentro de uma dada célula dessa grelha sem incorrer no cálculo de distâncias. A título de exemplo, e usando a mesma topologia da Fig. 1, pode definir-se um conjunto de triângulos, usando como vértices as várias âncoras detectadas, para construir zonas de localização onde se poderão, ou não, encontrar os nós. Esta situação é ilustrada na Fig.2.

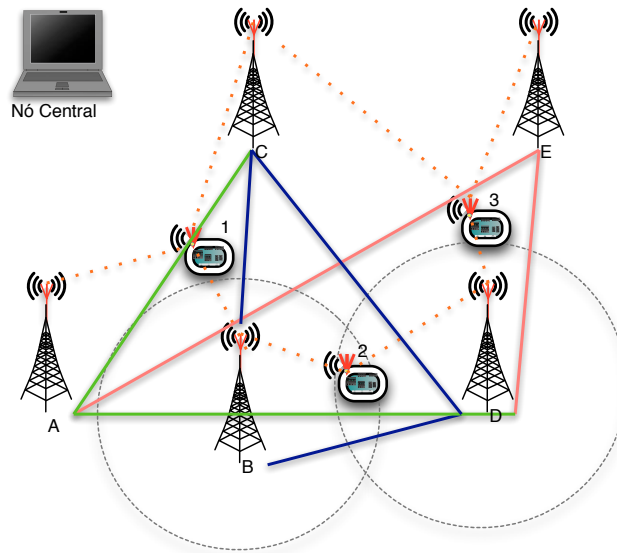


Fig. 2 - Localização aproximada por definição de áreas de intersecção

Nesta variante, a localização aproximada dos objectos é definida pela posição aproximada dentro dos triângulos. Na Fig. 2, os nós 1 e 2 encontram-se dentro do triângulo ACD, mas apenas 2 é localizado dentro de BDC; situação semelhante se passa com os nós 2 e 3, e os triângulos BCD e ADE. Determinada a zona de intersecção dos vários triângulos detectados pelo nó, é possível este estimar a sua posição no centro de gravidade dessa zona.

Um esquema mais simples, e que não exige o cálculo das zonas de sobreposição entre triângulos de *beacons*, é a que está igualmente ilustrada na Fig.2. A posição do nó 2 é estimada no centro da área em que os círculos de alcance das torres B e D se sobrepõem. As âncoras, cujo raio de alcance é conhecido, enviam periodicamente *beacons* com a sua posição geográfica. Um nó recebe vários destes *beacons*, de várias âncoras diferentes, ao longo de um determinado período de tempo e determina a zona de intersecção dos círculos (esferas em 3D) de alcance das várias âncoras com que consegue comunicar. A sua posição estimada é a média aritmética das posições das âncoras recebidas. A precisão relativa que se consegue é de 1/3 da distância que separa 2 âncoras adjacentes. Mais uma vez não se recorre ao cálculo de distâncias.

Uma outra variante deste sistema simples, consiste numa análise das condições de recepção dos *beacons* em várias posições da zona de cobertura dos nós fixos. Esta solução, que não envolve igualmente a medição de distâncias para os nós fixos e muito menos a resolução do sistema de equações que dá a posição aproximada do nó através da triangulação com as âncoras geo-referenciadas, implica uma prévia campanha de medidas que regista as condições de recepção (intensidade do sinal) dos *beacons* em diferentes pontos da zona coberta. Estes valores são guardados numa base de dados, normalmente num ponto central, acessível a todos os nós. Os valores previamente obtidos no referido *site-survey* são depois comparados com aqueles obtidos em tempo-real, na altura que se pretende determinar a posição dos nós móveis. Esta comparação, que envolve sempre uma interpolação, permite determinar o conjunto de valores registados mais aproximados aos valores medidos durante o procedimento de posicionamento, i.e. os valores de intensidade de sinal são comparados com o “mapa” de medidas efectuado durante o *site-survey*. Este método de mapeamento, originalmente desenvolvido pela Microsoft no projecto RADAR, é computacionalmente simples mas envolve uma campanha de medidas exaustiva. A precisão do posicionamento é tanto maior quanto mais pontos forem considerados no *site-survey* e quanto mais *beacons* forem utilizados.

### Técnicas e Tecnologias para medição de distâncias

Na detecção da posição de um dado objecto, podem ser utilizados diferentes métodos e tecnologias. A maioria dos métodos envolve usualmente a medição de distâncias, entre um ponto cujas coordenadas se pretendem determinar, e nós cujas coordenadas são bem conhecidas e, geralmente, globalmente geo-referenciadas. É precisamente na medição destas distâncias que o factor tecnologia desempenha um papel relevante.

A medição de distâncias usualmente mais usada tira partido da tecnologia rádio usada na comunicação entre nós, assentando no princípio físico de propagação das ondas electromagnéticas em espaço livre. É sabido que a relação entre a potência recebida por um receptor e a potência emitida por um transmissor depende da distância entre os dois, de acordo com a seguinte expressão:

$$P_{\text{recv}} = c \frac{P_{\text{tx}}}{d^\alpha} \Leftrightarrow d = \sqrt[\alpha]{\frac{cP_{\text{tx}}}{P_{\text{recv}}}} \quad (1)$$

sendo  $\alpha$  o coeficiente de atenuação (empírico) do meio.

A equação (1) é, na realidade, uma generalização, da fórmula de Friis ( $\alpha = 2$  e  $c = G_t G_r (\lambda / 4\pi)^2$ ) de propagação em espaço livre no meio “ar”, livre de distorção multi-percurso. Como o sinal recebido é, em muitos ambientes, fortemente afectado por reflexões, difusão, ruído, etc., a indicação do RSSI (Received Signal Strength Indication), factor proporcional à potência do sinal recebido, não se relaciona de forma tão simples com a distância ao emissor. Para se ter uma noção do erro associado à determinação da distância através da medição do RSSI, ilustra-se na Fig. 3 a dispersão dos valores da distância (e também em função da potência do sinal, no gráfico mais à direita) obtida através deste método.

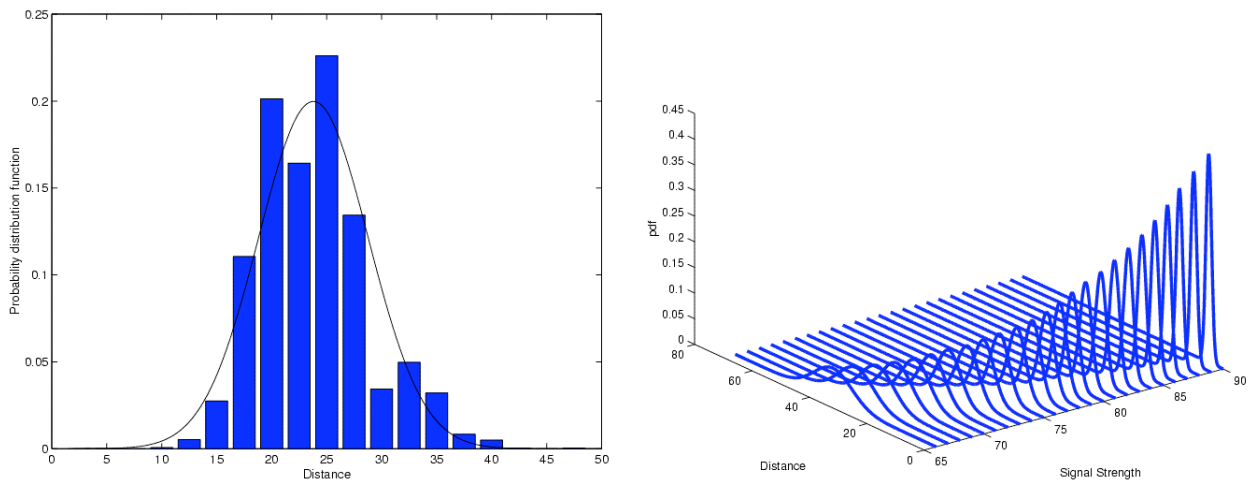


Fig. 3 - Dispersão da distância em resultado da medição imprecisa do valor de RSSI

Este fenómeno, especialmente acentuado quando as condições de medição se afastam muita da situação de “espaço livre”, resultam numa imprecisão de medida que impede que se obtenha um erro inferior às dezenas de metros. Consequentemente, procuraram-se outras técnicas de medição de distâncias que podem recorrer a outras tecnologias.

Uma das técnicas mais utilizadas é a medição do tempo de voo de uma onda, electromagnética ou mecânica. Quando se usam ondas electromagnéticas (e.g. GPS), recorre-se à medição precisa do instante de recepção (TOA - Time of Arrival) de um sinal radio-eléctrico que transporta a informação do instante em que foi emitido (timestamp). A diferença entre estes dois tempos corresponde ao tempo de propagação do sinal entre emissor e receptor e, portanto, à distância que os separa, já que é conhecida a velocidade de propagação dos sinais no meio em causa (velocidade da luz, no caso de ondas electromagnéticas). Todavia, esta medição exige uma sincronização precisa entre emissor e receptor, nem sempre possível,

e uma distância significativa entre eles, para que a diferença de tempos seja minimamente mensurável. Nestas situações é possível atingir precisões da ordem do metro.

Para permitir medir distâncias mais curtas, recorre-se à tecnologia de ultra-sons (pode usar-se infravermelhos mas com base numa técnica semelhante ao radar). Igualmente, para se evitar o problema da sincronização precisa entre relógios de emissores e receptores, usa-se uma técnica ligeiramente diferente da anterior e que consiste em registar o tempo de voo da onda de ultra-sons (uma rajada de ultra-sons, na realidade) a partir da altura em que se recebe uma "ordem" por rádio. Esta técnica, designada por TDOA - Time Difference of Arrival, permite que a sincronização seja feita ponto-a-ponto, através do envio de uma mensagem rádio cujo tempo de propagação normalmente se despreza (até porque a distância é relativamente curta). Este método é bastante preciso, com erros da ordem dos centímetros, e bastante simples do ponto de vista de algoritmo de medição. Todavia, está limitada pela direccionalidade e alcance dos transdutores de ultra-sons o que impede, na prática, a medição de distâncias para lá da centena de metros, mesmo em condições favoráveis. Acresce à lista de desvantagens o facto de os nós terem de ser especialmente equipados com sensores de ultra-sons destinados à medição de distâncias e que estes necessitam ser calibrados para se obter a precisão máxima.

Finalmente, com o advento da tecnologia de UWB (e.g. impulsos de 1,3GHz de LB) é possível comunicar e, simultaneamente, medir facilmente a distância entre emissor e receptor com precisões da ordem dos centímetros. Esta tecnologia é fracamente afectada pela distorção multi-percurso e permite, além de débitos de comunicação elevados, a medição das características do "caminho de propagação directo" entre emissor e receptor (usando tipicamente TOA de ida-e-volta) e portanto da respectiva distância. A grande desvantagem consiste na curta distância a que os dispositivos UWB conseguem atingir, o que limita a sua utilização, neste contexto, a alcances pouco interessantes.

## Rede Multihop

Tipicamente, numa rede de sensores, não existem âncoras (ou existem muito poucas) para determinar a posição dos diferentes nós da rede. É assim impossível a um nó reconhecer a sua localização geográfica baseado na informação que recolhe das âncoras no terreno (à distância de 1 salto).

No contexto presente, teremos uma rede totalmente ligada, formada por todos os nós que se interligam através de uma malha de ligações *multihop*. Esta malha permite que cada nó determine a sua distância aos vizinhos, através de uma das técnicas de medição de distâncias acima referidas, calculada no caminho mais curto entre dois nós. Alternativamente, pode considerar-se apenas a informação de conectividade entre nós, embora isto resulte numa menor precisão na obtenção da localização.

A informação de distância (ou conectividade) relativa é introduzida numa matriz de distâncias entre nós. A esta matriz é aplicado o algoritmo de *Multidimensional Scaling* (MDS) resultando num mapa com as posições relativas de todos os nós. A Fig. 4 ilustra, com uma rede de dimensões muito reduzidas, o resultado da aplicação do algoritmo para obtenção do posicionamento relativo entre nós.

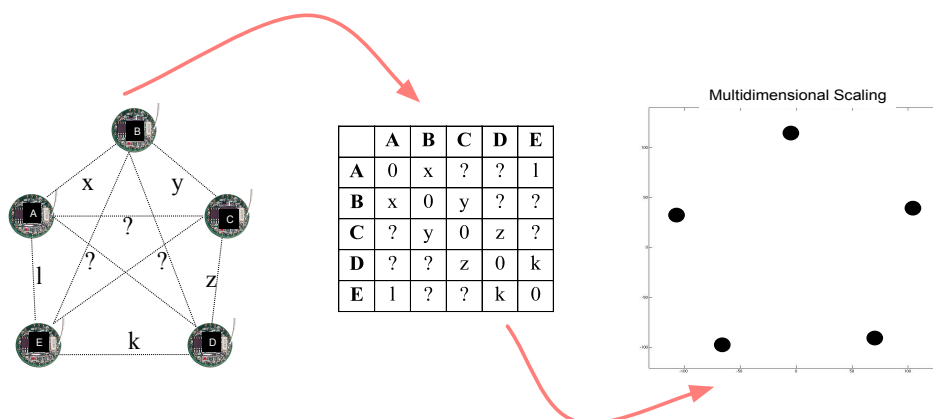


Fig. 4 - Algoritmo de localização relativa.

Após se obterem medições aproximadas de distância entre todos, ou apenas alguns, nós da rede, a aplicação do algoritmo traduz-se na obtenção de coordenadas dos nós, relativamente a um referencial relativo. No caso da figura, apesar de se poderem apenas determinar as distâncias  $k$ ,  $l$ ,  $x$ ,  $y$  e  $z$ , o algoritmo é capaz de obter as coordenadas dos vários nós, coordenadas  $X, Y$  relativas a uma origem situada no centro do plano, e posicionando-os, nesse plano, relativamente uns aos outros. Estas posições relativas podem ser transformadas em posições absolutas se forem utilizados pontos de referência geo-referenciados.

A ideia na base do algoritmo MDS consiste na minimização das diferenças entre as distâncias estimadas ( $d_{ij}$ ) e as distâncias medidas ( $\delta_{ij}$ ) entre os diferentes nós, i.e. minimizar a expressão:

$$\sigma = \sum_{i < j} W_{i,j} (d_{ij}(X) - \delta_{ij})^2$$

Um problema relativamente grave desta solução reside na computação intensiva que o algoritmo MDS requer. Este problema pode ser contornado se esta computação for realizada num nó central com suficientes capacidades de cálculo.

## Rede Mista

A técnica de localização de nós, numa situação mista em que exista um número reduzido de âncoras e nem todos os nós têm ligação a pelo menos três âncoras, socorre-se do facto de existirem ligações *multihop* até a um nó que conheça a sua localização (âncora). Nesta situação, não é possível obter estimativas de distância relativamente a um conjunto de âncoras de uma forma directa, mas é possível fazê-lo indirectamente por *multihop*, utilizando os já conhecidos algoritmos de multilateração.

Ao contrário da 1ª alternativa, em que todos os nós tinham uma ligação directa (1-hop) com várias âncoras, e da 2ª alternativa, em que não existem âncoras (serão precisas pelo menos duas para um posicionamento global), o princípio de funcionamento desta técnica pressupõe que existem nós da rede que conseguem referenciar-se à custa de um número mínimo de âncoras, mesmo não estando em ligação directa com estas.

Um algoritmo possível é a contagem do número de hops entre quaisquer 2 âncoras, usando sempre o caminho mais curto, e estimando o "tamanho médio" de 1 hop (dividindo a distância que separa as âncoras pelo nº de hops). Este tamanho médio é depois difundido pela rede a partir da âncora que iniciou o processo. Um nó, numa posição desconhecida, pode agora usar esta informação para estimar a sua distância (em nº de hops e em metros, uma vez que sabe a medida de 1 hop) às várias âncoras existentes e usar um algoritmo comum de multilateração para determinar a sua posição. Claro que esta técnica não implica a medição de distâncias entre nós, mas assume uma determinada regularidade na rede para que não haja uma variância grande no tamanho de um hop. Se isto acontecer, poderão existir erros de localização grosseiros para alguns nós.

Quando for possível obter uma medição credível da distância entre nós da rede, e desde que haja um número suficiente de nós vizinhos, um nó pode tentar obter a verdadeira distância euclidiana até a uma dada âncora distante. Um exemplo do método é ilustrado na Fig. 5.

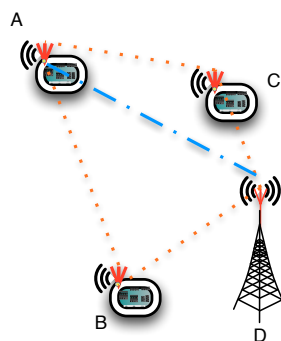


Fig. 5 - Estimação da distância por via indirecta

As distâncias BD e CD são conhecidas, assim como o são as distâncias AC, AB e BC (não representada a ligação na figura). Se assim for, é possível determinar a distância AD para a qual não há ligação rádio directa (ou de boa qualidade que leve a uma medida credível). Relativamente ao anterior, este método dá-se bem com redes com distribuição não-homogénea de nós. Contudo, exige mais âncoras que a técnica de contagem de saltos, a não ser que se usem métodos iterativos de multilateração, em que os nós que vão conhecendo a sua localização (usando a medição indirecta de distâncias às âncoras), sirvam por sua vez como âncoras para nós que ainda desconheçam a respectiva posição. É óbvio que a acumulação de erros de medida é o principal inimigo deste método de multilateração indirecta por determinação da distância euclidiana.

## Ilhas isoladas

Em parte das alternativas consideradas poder-se-á considerar a hipótese de um *objecto* ou grupo de *objectos* estar demasiado longe de um nó fixo que permita a conectividade de toda a rede, constituindo assim uma ilha isolada. Neste caso, a opção de utilização de um nó móvel para efectuar o posicionamento e recolha da informação deste(s) nó(s) pode ser credível.

De facto, nem todas as soluções de localização trabalham bem com este cenário de ilhas isoladas. Obviamente, que o método de triangulação de 1 hop não pode ser utilizado pois não existem âncoras ao alcance da(s) ilha(s). Resulta daqui que apenas os métodos indirectos de multilateração (solução mista) ou de localização relativa (solução *multihop*) funcionam. Contudo, no primeiro caso, como a ilha está isolada, é necessário eleger um nó âncora que serve de raiz para a multilateração dos restantes nós da ilha, raiz esta que será posteriormente referenciada quando da passagem de um móvel com GPS. No segundo caso, o principal problema da utilização de um algoritmo do tipo do MDS para localização relativa é a sua complexidade computacional; a não ser que se recorra a um esquema de computação distribuída, será difícil a um nó com capacidades computacionais reduzidas e, ainda por cima, em situação de poupança energética, poder suportar o cálculo da matriz de posicionamento.

## Discussão de Alternativas

O método mais genérico, e com menor impacto ao nível de custos em hardware dedicado, é o da localização relativa numa rede emalhada. No entanto, este tem o inconveniente de requerer uma computação centralizada da localização dos diferentes nós o que nem sempre é fácil (ilhas isoladas).

No outro extremo, teremos o método clássico de multilateração directo que implica a instalação de várias âncoras e, portanto, de custos acrescidos. Se o número de âncoras for suficientemente grande e a precisão requerida não for muito elevada, pode até considerar-se a hipótese de adoptar uma variante que não implique a medição exaustiva de distâncias entre nós, o que ajuda a reduzir o consumo dos nós, uma vez que a informação sobre a conectividade entre nós e âncoras é suficiente.

Uma solução de compromisso é considerar uma técnica de multilateração indirecta que permite poupar no número de âncoras a instalar mas que garante uma menor precisão na localização dos nós. É necessário um estudo mais detalhado para perceber se o erro máximo tolerável é compatível com o que é possível obter com este método (nas suas variantes).

Por forma a comparar estas diferentes soluções apresenta-se em Tab. I um quadro comparativo que considera métricas objectivas do ponto de vista de funcionamento do sistema.

Nesta análise comparativa, para além das considerações já feitas sobre a dimensão da infra-estrutura necessária, da precisão associada ao método de localização e à facilidade de englobar a existência de ilhas isoladas de nós, considera-se os aspectos de custo, quer de hardware (associado à utilização de nós fixos), quer de software (referente à complexidade do algoritmo de posicionamento) de importância chave para a escolha do sistema a usar:

Método de Localização	Técnica	Nº Âncoras	Infra-estrutura	Precisão	Ilhas	Custo (HW/SW)	Obs.
multilateração directa	medição distâncias	elevado	ponto-a-ponto ou multiponto entre âncoras	RSSI (~dezena metros)	não	elevado/baixo	requer posicionamento preciso âncoras
multilateração directa	intersecção de áreas	elevado	ponto-a-ponto ou multiponto entre âncoras	RSSI + 1/3 distância entre âncoras	não	elevado/médio	requer posicionamento preciso âncoras
condições de recepção	mapeamento	muito elevado	ponto-a-ponto ou multiponto entre âncoras	depende da densidade de âncoras e do nº de pontos medidos	não	elevado/baixo	requer <i>site-survey</i> ; requer medidas em múltiplos pontos
multihop puro	MDS	3 para posicionamento global	não	RSSI	sim (cada ilha tem de calcular a sua sub-rede)	baixo/elevado	requer nós c/capacidade processamento; a solução da rede é global
multilateração indirecta	contagem saltos entre âncoras	mínimo	ponto-a-ponto ou multiponto entre âncoras	depende da regularidade dos nós	desde que alguns nós sejam geo-referenciadas	médio/baixo	requer posicionamento preciso âncoras; aplicável em distribuições homogéneas de nós.
multilateração indirecta	medição distâncias	mínimo	ponto-a-ponto ou multiponto entre âncoras	RSSI + erros acumulados	desde que alguns nós sejam geo-referenciadas	médio/médio	requer posicionamento preciso âncoras; aplicável em distribuições não-homogéneas de nós

Tab. 1 - Comparação de soluções de localização do ponto de vista de sistema.

Na Tab. 2 pode observar-se, de uma forma condensada, o impacto das diferentes soluções nos aspectos relacionados com os nós.

Neste quadro, são contabilizados os aspectos de consumo (tanto maior quanto mais potência os nós têm de empregar para medir a sua distância às âncoras), periodicidade de comunicação (que pode restringir o máximo *duty-cycle* de envio de mensagens de monitorização dos parâmetros dos nós), da simultaneidade da identificação (e troca de mensagens) em conjunto com o processo de localização e do impacto sobre o custo do *hardware* e *software* dos nós.

Método de Localização	Técnica	Consumo	Periodicidade Comunicação	Identificação simultânea	Custo (HW/SW)	Obs.
multilateração directa	medição distâncias	++	s/ restrições	sim	baixo/baixo	nenhuma alteração HW; algoritmo correr nas âncoras
multilateração directa	intersecção de áreas	- (conectividade)	s/ restrições	não	baixo/fácil	nenhuma alteração HW; algoritmo fácil nos nós
condições de recepção	mapeamento	-	s/ restrições	não	baixo/baixo	nenhuma alteração HW; algoritmo fácil nos nós
multihop puro	MDS	+	depende velocidade processamento	sim	elevado/ elevado	algoritmo muito pesado para os nós
multilateração indirecta	contagem saltos entre âncoras	- (conectividade)	s/ restrições	não	baixo/baixo	nenhuma alteração HW; algoritmo fácil nos nós
multilateração indirecta	medição distâncias	+	s/ restrições	sim	baixo/baixo	nenhuma alteração HW; algoritmo fácil nos nós

Tab. 2 - Comparação de soluções de localização do ponto de vista das nós.