

# Algoritmo de Navegação Robótica em Redes de Sensores sem Fio baseado no RSSI

Antonio R. de Carvalho-Jr<sup>1</sup>, Afonso D. Ribas<sup>1</sup>, Carlos M. S. Figueiredo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Pesquisa em Computação (NepComp)  
Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica (FUCAPI)  
Manaus – AM – Brasil

{antonio.ramos, afonso.degmar, mauricio.figueiredo}@fucapi.br

**Abstract.** *Most environmental monitoring applications require a wider observation or a simple interaction capability that Sensors Networks are unable to offer. Thus, many papers have addressed the interaction of these network with mobile robots. This article describes a navigation algorithm for a mobile robot in order to find a node sensor that sends a particular event. This solution is based on RSSI data obtained through the exchange of packet between a sensor node and the sink node, eliminating the requirement of a tracking system, which can be costly.*

**Resumo.** *Muitas aplicações de monitoramento ambiental exigem uma observação mais ampla ou uma capacidade de interação que simples Redes de Sensores são incapazes de oferecer. Nesse sentido, vários trabalhos da literatura têm abordado a interação dessas redes com robôs móveis. Este artigo descreve um algoritmo de navegação para um robô móvel de forma que o mesmo possa localizar um nó-sensor que emite um determinado evento. Esta solução baseia-se em dados de RSSI obtidos por meio da troca de pacotes entre um nó-sensor e o sink da rede, eliminando a exigência da existência de um sistema de localização, o que pode ser custoso.*

## 1. Introdução

A necessidade de monitoramento vem crescendo cada vez mais em nossa sociedade, seja em um ambiente doméstico, industrial ou ambiental. As pessoas necessitam obter informações do meio onde estão vivendo ou ambientes remotos que não são convencionais.

Particularmente, nas aplicações de monitoramento remoto, duas tecnologias bastante estudadas com grande potencial de aplicação prática são as redes de sensores sem fio, e.g. Loureiro et al. (2003), e os robôs móveis autônomos, e.g. Trincavelli et al. (2008). As RSSFs permitem a coleta de dados sensoriais a partir de pequenos dispositivos no ambiente. Tais dispositivos utilizam-se da comunicação sem fio para a coleta de dados e o desafio é a operação com economia de bateria. Já os robôs autônomos podem ter maior capacidade de monitoramento com sensores mais complexos, como câmeras, e o desafio é fazer com que o robô se locomova corretamente no ambiente.

Um problema explorado nas RSSFs é o da localização de nós, e.g. Boukerche et al (2007). Tal sistema de localização pode ser obtido de um sistema global de posicionamento ou a partir de algoritmos distribuídos. Seu objetivo é poder associar a

localização aos dados sendo monitorados, permitindo também a uma entidade externa interagir mais rapidamente com o local detectando algum evento de interesse. Por outro lado, localizar um nó sensor em uma rede de sensores sem fio não é uma tarefa trivial, pois a necessidade de equipamentos e/ou comunicação adicionais agregará aos nós sensores mais complexidade, consumo de energia e custo.

Neste artigo, apresentamos um algoritmo de navegação robótica para a localização de um determinado nó sensor gerando um evento de interesse a partir do RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), indicador de nível de sinal recebido, como referência. Tal sistema não exige que a posição dos nós sensores seja previamente conhecida ou que haja a necessidade de um sistema de localização, simplificando a RSSF e possibilitando um incremento de observação e/ou interação a partir do robô. No entanto, há a necessidade de levar em consideração a real caracterização da propagação do sinal no ambiente em questão, o que também é mostrado e avaliado neste trabalho.

O conteúdo está organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a fundamentação teórica e trabalhos relacionados; a seção 3 apresenta a solução proposta para o sistema de navegação; a seção 4 apresenta os testes e avaliações; por fim, a seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## **2. Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados**

### **2.1. Redes de sensores sem fio**

Segundo Loureiro et al (2003), redes de sensores sem fio (RSSFs) diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente essas redes possuem um grande número de sensores distribuídos, têm restrições de energia, e devem possuir mecanismos para auto-configuração e adaptação devido a problemas como falhas de comunicação e perda de sensores. Ainda, uma RSSF tende a ser autômata e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede. Isto significa que algoritmos distribuídos tradicionais devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados diretamente.

Sob a necessidade de operação em larga escala, em áreas remotas, de forma autônoma e por longos períodos de tempo, as RSSFs apresentam grandes desafios quanto ao consumo de energia e custo por dispositivo. Assim, observa-se que muitas aplicações têm empregado nós sensores simples, e.g. Arampatzis et al (2005), limitando a capacidade de observação dos mesmos.

### **2.2. Robótica Móvel**

Segundo Marchi (2001), um robô móvel é um dispositivo mecânico montado sobre uma base não fixa, que age sob o controle de um sistema computacional, equipados com sensores e atuadores que o permitem interagir com o ambiente.

A navegação é um processo usado por um robô móvel para movimentar-se desde uma posição inicial a uma posição final tendo como base alguns pontos de referência, e.g. Ribeiro et al. (2002). A navegação robótica em um ambiente real é uma tarefa complexa, pois além do problema de locomoção com os obstáculos do mundo real, outros problemas são a determinação do alvo e o planejamento da trajetória. Segundo Ribeiro et al. (2002) as metodologias desenvolvidas para o planejamento de trajetória podem ser classificadas em dois grupos: métodos globais e métodos locais. Os métodos globais dão a habilidade ao robô para se localizar em termos absolutos (GPS – *Global*

*Positioning System*) ou em relação a um sistema de mapas, e mover-se para um ponto desejado. Os métodos locais dão a capacidade ao robô de determinar sua posição relativa a objetos próximos (estacionários ou não) e interagir com estes de forma correta.

### 2.3. Interação entre robôs e RSSFs

Robôs, em sua maioria, auxiliam os homens no monitoramento de área de difícil acesso. Dada a importância e utilização das RSSFs para o monitoramento também para este fim, cria-se um potencial muito grande na junção dessas duas áreas. Um robô pode incrementar a capacidade de monitoramento das RSSFs, bem como pode se utilizar delas para executar suas atividades.

Uma forma de interação entre RSSFs e robôs móveis consiste do auxílio da cobertura de áreas de uma RSSFs, o que é demonstrado em Batalin et al. (2002). Neste trabalho, um nó sensor em um robô móvel busca áreas ainda não cobertas pela rede e se posiciona para melhorar ou amplificar a área de monitoramento daquele ambiente.

Outro trabalho aborda o uso de RSSFs e robôs em aplicações de resgate em incêndios, e.g. Kantor et al. (2003). Sensores coletando dados de temperatura podem fornecer um gradiente de navegação aos robôs com o objetivo de auxiliar seres humanos a encontrarem uma saída segura.

Bulusu et al. (2002) e Corke et al. (2005) são trabalhos que visam a navegação robótica assistida por uma RSSF, onde o objetivo dos robôs é atingir um determinado nó da rede. Ambos dependem de um sistema de localização na RSSF. Em Bulusu et al. (2002), os nós têm suas localizações previamente definidas e o robô usa um sistema GPS para atingir o ponto determinado. Já Corke et al. (2005) assume que os nós sensores são dotados de GPS, onde o robô pode seguir o caminho sugerido pela rede e interagir com a mesma para futuros eventos.

A solução aqui proposta encontra-se exatamente nesse último contexto, onde robôs devem atingir os nós emitindo eventos. No entanto, este se diferencia dos demais ao desconsiderar totalmente o conhecimento prévio da localização dos nós ou da execução de um sistema de localização. O mesmo se baseia somente na troca de dados entre nós, uma atividade fundamental das RSSFs.

## 3. Sistema de navegação baseado em RSSI

### 3.1. Visão geral

Em uma RSSF, nós sensores coletam dados em os transmitem sem fio em um esquema *multihop* a um destino, comumente chamado nó *sink* ou *gateway*. Modelos de propagação nos mostram que há uma relação da distância entre transmissor e o receptor e o nível de sinal recebido por este último, e.g. Rappaport (2001). Portanto, um robô pode usar esse princípio para orientar sua navegação em direção a um nó transmitindo um sinal de interesse pela rede, numa técnica conhecida como *sniffing*. O princípio básico de navegação é explorar uma área de interesse medindo a intensidade do sinal recebido e caminhar na direção onde o sinal recebido é mais forte até um certo limite onde considera-se que o alvo foi atingido.

No entanto, experimentos práticos, como em Figueiredo et al. (2009), têm mostrado que a característica de propagação do sinal torna a estimativa da distância pelo RSSI muito imprecisa e extremamente dependente do ambiente. Tal fato exige que o

algoritmo proposto leve em consideração tais particularidades, o que é apresentado na subseção a seguir.

### 3.2. Caracterização do RSSI

Antes de apresentar o algoritmo de navegação foram realizados alguns experimentos para a identificação do padrão de propagação do sinal de um sensor em alguns ambientes. O ambiente escolhido foi o de floresta tropical, visando que o sistema em questão possa contribuir para o monitoramento ambiental da amazônia.

Foram realizados experimentos utilizando sensores Iris da Crossbow em duas situações comuns (ver figura 1): em mata fechada, com nós no solo, e trilha, com nós a 1,20 m do solo. Para caracterização da variação do RSSI, posicionou-se 2 nós, um transmissor e um receptor, variando-se a distância entre eles. Para cada distância foram feitas 33 etapas de medição sendo que cada etapa consistia do envio de 20 pacotes com dados de temperatura, pressão, umidade e RSSI para o receptor. Em seguida foi obtida a média do RSSI para cada distância, bem como o seu desvio padrão, como pode ser observado nos Gráficos 1 e 2.



Figura 1 – Experimentos em trilha e mata fechada

Observando os dados do Gráfico 1 e 2, podemos perceber que existe uma área de confiança na qual conseguimos identificar se estamos nos aproximando ou não do nó sensor de destino. É o caso de distâncias até 10 m na trilha e até 3.8 m em mata fechada. Porém, existe uma área na qual o RSSI permanece praticamente constante, em valores menores que -91 dB, onde há recepção por uma longa distância mas não há variação do RSSI. Isso deve-se ao fato particular do nó sensor possuir uma limitação da percepção do RSSI e de que há constantes retransmissões na zona de sinal fraco, fazendo a recepção se prolongar a distâncias maiores mesmo em baixos níveis de sinal.

Esse resultado ocasiona uma área de incerteza na estimativa da distância que representa 97.2% da área da circunferência no experimento na trilha, e 92.7% da área da circunferência no experimento da mata fechada. Tal característica deve ser levada em consideração na solução de navegação e dá uma dimensão do real problema a ser enfrentado na prática.

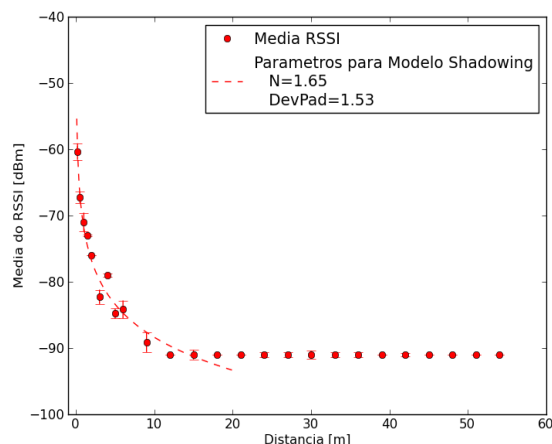


Gráfico 1 – Distância versus RSSI para o experimento da Trilha

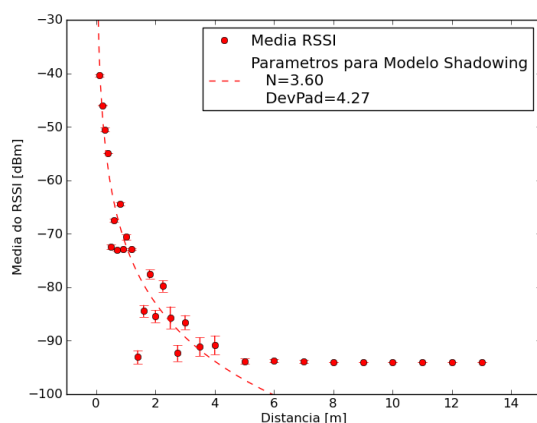


Gráfico 2 – Distância versus RSSI para o experimento da Mata Fechada

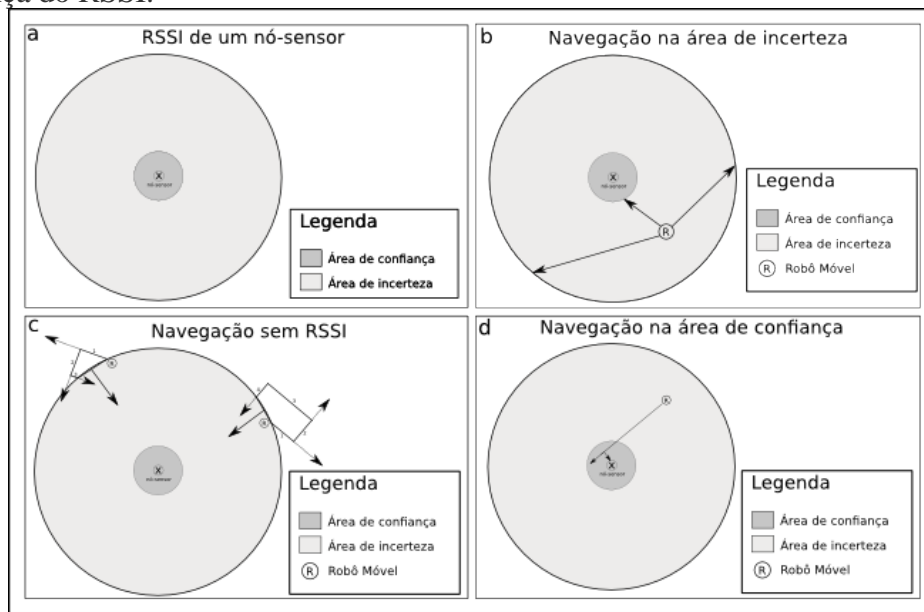
### 3.3. Algoritmo de Navegação

Com as características observadas no experimento notamos que há duas áreas que devem ser consideradas para a navegação até um nó sensor. Uma área de incerteza na qual um robô, tendo como informação apenas o RSSI, não saberá se está aproximando-se ou afastando-se de seu destino. A outra área é a que o robô consegue identificar se está se distanciando ou aproximando do nó (Figura 2a).

O algoritmo que descreve a solução de navegação é apresentado na Figura 2. O mesmo baseia-se na recepção de um pacote de dados de interesse onde extrai-se o RSSI. Com base no RSSI, verifica-se se o mesmo está na área de incerteza ( $\text{RSSI} < -91 \text{ dB}$ ) ou não.

Caso esteja na área de incerteza, o robô irá navegar em uma única direção até que perca o sinal ou chegue na área de confiança (Figura 2b). Se sair da área de sinal, o robô marca aquele ponto como um ponto inicial na “borda” da área coberta pelo sinal. Após isso, ele realizará uma série de passos (Figura 2c) para encontrar um segundo ponto de borda. Basicamente, são realizadas sucessivas conversões de 90 graus à esquerda, que independente do ângulo de saída fará com que o robô volte para a área de cobertura do sinal. Com dois pontos de borda, o robô poderá calcular uma secante na circunferência. De acordo com as propriedades da secante, se uma reta  $s$ , secante a uma

circunferência de centro **O**, intercepta a circunferência em dois pontos distintos **A** e **B** e se **M** é o ponto médio da corda **AB**, então o segmento de reta **OM** é perpendicular à reta secante **s**. Dessa forma, após encontrarmos os dois pontos na circunferência, basta o robô navegar perpendicularmente a partir do ponto médio do segmento de reta entre os pontos, que o mesmo irá em direção ao centro da área do sinal, ou seja, para o transmissor do sinal. Ao caminhar na direção do centro, o robô encontrará a área de confiança do RSSI.



**Figura 2 – a. Representação gráfica da propagação de sinal no experimento; b. Partida do robô em uma direção aleatória; c. Navegação do robô quando perde o sinal; d. Navegação do robô em direção ao centro ou quando encontra-se na área de confiança.**

Uma vez estrando na área de confiança, ou já partindo desta área, o robô permanece andando na mesma direção (ângulo) enquanto o sinal do RSSI estiver aumentando. Ao detectar uma diminuição do sinal, o robô rotaciona 90° e continua navegando. Caso o sinal volte a diminuir, seguimos em direção contrária (giro de 180 graus) e caso ocorra novamente, voltamos na direção contrária repetindo os passos acima até estarmos em uma distância (ou por vezes em uma determinada faixa de RSSI estipulada) de confiança para afirmarmos que o robô móvel chegou ou está próximo ao seu destino.

```

funcao expiraTemporizador( )
  regioao = SEM_COMUNICACAO
  escolha( passos )
  caso 0:
    salvarPosicaoRelativaInicial( roboMovel.X(), roboMovel.Y() );
    avanca( DIST_SEM_COM )
  caso 1:
    girar_avancar( 90, DIST_SEM_COM )
  caso 2:
    girar_avancar( 90, 2*DIST_SEM_COM )
  caso 3:
    girar_avancar( 90, DIST_SEM_COM )
  fim_escolha
  passos = passos + 1
fim_funcao

```

```

funcao receberPacote(...)
se ( (mediaRssiAtual = -91 e mediaRssiAnterior = -91) então
  escolha( regioao )
    caso CEGA:
      avancar( DIST_CEGA )
      passos=0
    caso PROXIMA:
      girar_avancar( 180, DIST_PROX )
    caso SEM_COMUNICACAO:
      salvarPosicaoRelativaFinal( roboMovel.X(), roboMovel.Y() )
      ponto_medio = calcularPontoMedio( pegarPosRelInicial,
                                       pegarPosRelFinal )
      direcao = calcularDirecao( pegarPosoRelInicial,
                                pegarPosRelFinal )
      irPara( ponto_medio )
      avancarDirecao(DIST_CEGO, direcao)
    fim_escolha
    regioao = CEGA
  senao
    se ( (mediaRssiAtual - mediaRssiAnterior) < LIMIAR_RSSI) então
      girar_avancar( 90, DIST_PROX )
    senao
      avancar(DIST_PROX)
    fim_se
    regioao = próxima
  fim_se
  reinicia_temporizador(INTERVALO)
fim_funcao

```

**Figura 3 – Pseudo-algoritmo para Navegação Robótica baseada no RSSI.**

#### 4. Testes e Avaliação

Após a análise dos ambientes nos quais iremos aplicar nosso algoritmo de navegação, realizamos alguns experimentos com o algoritmo descrito na Figura 3 para os dois ambientes (trilha e mata fechada) utilizando o NS-2 (Network Simulator) [Fall 2010].

Para simularmos o ambiente real do experimento, definimos os parâmetros para o modelo *Shadowing* (Gráfico 1 e Gráfico 2) para que pudéssemos obter o mesmo comportamento do RSSI obtido nos experimentos. Além dos ajustes, adaptamos o código do NS-2 de modo que tenhamos o mesmo comportamentos desejado para realizarmos a navegação robótica segundo o algoritmo proposto. As simulações utilizaram um nó fixo e um nó móvel (que foi utilizado como o robô em nosso experimento).

Utilizamos como métrica de avaliação a variação da distância percorrida pelo nó móvel até chegar em seu destino ( $d_f$ ) pela distância inicial entre o nó fixo e o nó móvel ( $d_i$ ).

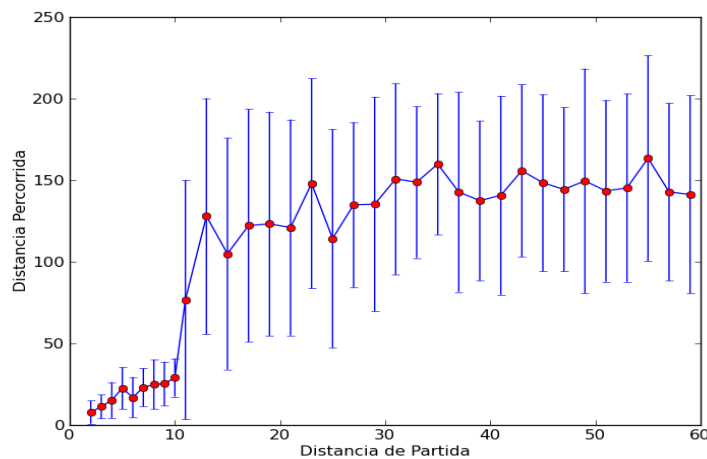
Para cada distância ( $d_i$ ) foram feitas 40 simulações, sendo cada uma com orientação inicial diferentes e, sem seguida, calculada a distância percorrida pelo nó móvel ( $d_f$ ). Em seguida, calculamos a média dos  $d_f$  para cada  $d_i$ .

#### 4.1. Resultados

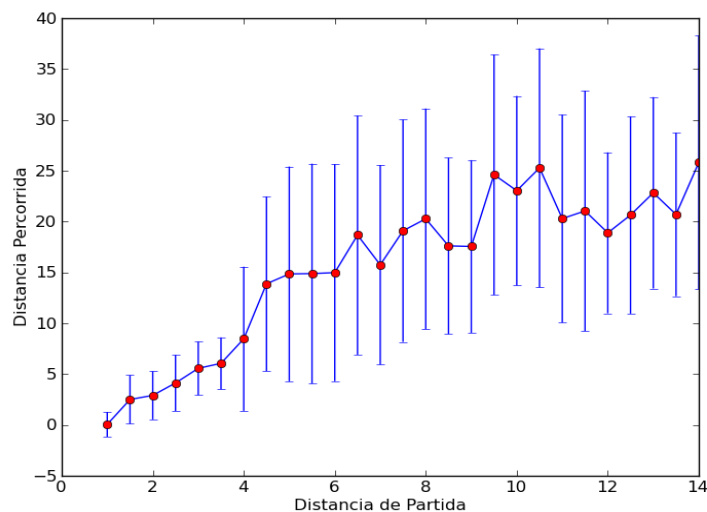
Como já foi dito, utilizamos na simulação o modelo de propagação observado nos experimentos. Desta forma, possíveis interferências no sinal são levadas em consideração, fazendo com que o alcance máximo não seja determinado por uma circunferência perfeita. No entanto, o que foi observado é que para as simulações realizadas, essa interferência não modificou substancialmente os resultados, pois o robô móvel sempre encontra a área de confiança.

Os Gráficos 3 e 4 apresentam os resultados obtidos com as simulações feitas para cada ambiente no NS-2. Em todas as simulações, o robô móvel conseguiu chegar ao seu destino final.

Além disso, pode-se observar que nos pontos em que o robô parte da área de confiança, em média, ele sempre percorre uma distância relativamente curta em relação a média da distância percorrida quando o mesmo parte da área de incerteza.



**Gráfico 3 – Distância percorrida versus Distância de partida para o modelo da Trilha.**



**Gráfico 4 – Distância percorrida versus Distância de partida para o modelo da Mata Fechada.**



## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho abordou o problema da navegação robótica assistida por Redes de Sensores sem Fio. Vislumbrando um cenário de monitoramento complexo, o sistema permite que robôs autônomos possam navegar até aos nós gerando eventos de interesse baseados apenas no RSSI do sinal transmitido por esses. A solução desenvolvida mostrou a real necessidade de conhecer as características da propagação do sinal no ambiente de interesse, a serem levadas em consideração pelo robô. A grande vantagem da solução é permitir a navegação em um ambiente sem conhecimento prévio e sem um sistema de localização em operação, o que simplifica os requisitos do sistema como um todo.

As simulações realizadas mostram um alto impacto das zonas de incerteza da cobertura do sinal transmitido, obrigando um robô autônomo a percorrer distâncias maiores. No entanto, mostrou-se que mesmo sob tais condições a tarefa pode ser bem sucedida.

Como trabalhos futuros, pretendemos avaliar a navegação robótica através de vários nós roteadores, percorrendo o caminho sink-transmissor em vários saltos. Ainda, pretende-se avaliar o emprego de antenas direcionais, que tendem a permitir uma diminuição das manobras exploratórias em áreas de incerteza.

## Referências

- Arampatzis, T. et al., 2005. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks,” in Proc. of the Mediterranean Control Conference (Med05), Limassol Cyprus, 2005.
- Boukerche, A. ; Oliveira, H. A. B. F. ; Nakamura, E. F. ; Loureiro, A. A. F.. Localization Systems for Wireless Sensor Networks. IEEE Wireless Communications, v. 14, p. 6-12, 2007.
- Bulusu N., Heidemann J., Estrin D. “Adaptive beacom sensor network with fading and mobility”. In Proceedings of IEEE PIMRC. Portugal, Lisboa. 2002.
- Corke Peter, Peterson Ron, RUS Daniela. “Network Robots: Flying robot navigation using a sensor net”. Robot Research, Springfield. April 2003.
- Fall K., Varadhan K., “The ns Manual”, Maio 2010.
- Figueiredo, C. M. S. ; Nakamura, E. F. ; Ribas, A. D. ; Souza, T. R. B. ; Barreto, R. S. . Assessing the Communication Performance of Wireless Sensor Networks in Rainforests. In: IFIP Wireless Days 2009, 2009, Paris. Proceedings of the 2nd IFIP Wireless Days, 2009.
- Kantor, G., Singh, S., Peterson, R., Rus, D., Das, A., Kumar, V., Pereira, G., Spletzer, J., “Distributed search and rescue with robot and sensor teams”. The 4<sup>th</sup> International Conference on Field and Service Robotics, July 2003.
- Loureiro, A.; Nogueira, J. M.; Ruiz, L. B. R.; Mini, R. <sup>a</sup> F.; Nakamura, E. F.; Figueiredo, C. M. S., “Redes de sensores sem fio”. 21<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2003 (Minicurso).
- Marchi, J. “Navegação de robôs móveis autônomos: Estudo e implementação de abordagens”. Universidade Federal de Santa Catarina. Março de 2002.

Rappaport T. S., *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001, pp. 123.

Ribeiro, M. I., Lima, P. “Motion Planning – Mobile robotics course”. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. 2002.

Trincavelli, M., Reggente, M., Coradeschi, S., Loutf, A., Ishida, H., Lilienthal, A. J. “Towards environmental monitoring with mobile robots”. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center. Nice, France, Sept, 22-26, 2008.