



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Informática

Preparação da Dissertação

Mestrado em Engenharia Informática

**Secure and reliable routing for
dependable wireless sensor networks**

Pedro Miguel Oliveira Marques da Silva (nº
26649)

1º Semestre de 2009/10

5 de Fevereiro de 2010



Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Informática

Preparação da Dissertação

Secure and reliable routing for dependable wireless sensor networks

Pedro Miguel Oliveira Marques da Silva (nº 26649)

Orientadora: Prof. Doutor Henrique João Lopes Domingos

Trabalho apresentado no âmbito do Mestrado em Engenharia Informática, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Informática.

1º Semestre de 2009/10

5 de Fevereiro de 2010

Resumo

As redes de sensores são uma tecnologia emergente no domínio da monitorização, de forma autónoma, de ambientes físicos. São formadas por pequenos dispositivos que se auto-organizam por modo a cobrirem uma área geográfica, podendo formar uma rede de larga escala com milhares de nós. Esta autonomia e auto-organização apresenta alguns desafios relacionados com os aspectos de segurança, nomeadamente, no que concerne com o encaminhamento de dados. O trabalho a realizar pretende contribuir para a criação de um modelo sistémico para o estudo de protocolos de encaminhamento seguro em redes de sensores sem fios (RSSF). A definição do modelo de adversário é o passo inicial para o enquadramento das tipologias de ataque que se pretende avaliar. Aliado ao modelo formal de Dolev-Yao, orientado para os ataques ao meio de comunicação, o estudo de novos modelos de adversário, relacionados com a intrusão e captura de nós é pertinente e apresentado dentro do âmbito deste trabalho.

Com vista a tornar as RSSF resistentes a algumas tipologias de ataques preconizadas no modelo de adversário, têm vindo a ser desenvolvidos diversos algoritmos de encaminhamento seguros. Pretende-se estudar alguns destes algoritmos, representantes do estado da arte neste domínio, estabelecendo uma matriz de medidas de resistência ao modelo de adversário, que permita então avaliar a efectividade destes .

Como contributo principal deste trabalho destaca-se a concepção de um ambiente de simulação inovador, uma vez que se pretende implementar funcionalidades não encontradas nos sistemas de simulação para as RSSF existentes. Este sistema proporcionará a possibilidade de desenhar e avaliar algoritmos de encaminhamento, concebidos para serem seguros, quando sujeito a ataques definidos no modelo de adversário. Esta avaliação estará centrada fundamentalmente na análise propriedades como o consumo de energia, fiabilidade, latência, correcção dos dados e correcção do comportamento do protocolo.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fios, Protocolos de encaminhamento seguros, Simulação de redes de sensores, Ataque por intrusão

Abstract

Sensor networks are an emerging technology in the field of monitoring, independently of physical environments. They are formed by small devices that self-organize in order to cover a geographical area can form a network of large scale with thousands of us. This autonomy and self-organization presents some challenges related to security aspects, in particular, with respect to the routing of data.

The work undertaken aims to contribute to the creation of a systemic model for the study of secure routing protocols in sensor networks wireless (WSN). The definition of the type of player is the initial step in the framework of different types of attack that was assessed. Coupled with the formal model of Dolev-Yao, which focuses on the attacks on the media, the study of new models of opponent-related intrusion and capture us is relevant and presented within the context of this work. In order to make the WSN resistant to some types of attacks outlined in this type of opponent, have been developed several routing algorithms insurance. The aim is to study some of these algorithms, representatives of the state of the art in this field, establishing an array of measures of resistance to the type of opponent, which then allows to evaluate the effectiveness of these.

As a major contribution, this study highlight the design of an innovative simulation environment, since they intend to implement features not found in simulation systems for the existing WSN. It will provide the opportunity to design and evaluate routing algorithms are designed to be safe when subject to attacks in the model defined adversary. This evaluation will focus primarily on analysis of properties such as energy consumption, reliability, latency, accuracy of data and correction of the behavior of the Protocol.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Secure Routing Protocols, WSN Simulation, Intrusion Attack

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Introdução geral	1
1.1.1	Caracterização de RSSF	2
1.1.2	Aplicações	3
1.2	Segurança em RSSF	3
1.3	Objectivos e contribuições previstas para a dissertação)	6
1.4	Principais contribuições e a sua avaliação	7
2	Trabalho relacionado	9
2.1	Desenho e Implementação de RSSF Seguras	9
2.1.1	Arquitectura de uma RSSF	9
2.1.1.1	Modelo da plataforma genérica de uma RSSF - <i>Mote</i>	9
2.1.1.2	Pilha de Protocolos de uma RSSF	10
2.1.2	Modelo de Adversário e Serviços de Segurança	12
2.1.2.1	Modelo de Dolev-Yao	12
2.1.2.2	Modelo de Intrusão em RSSF	13
2.1.2.2.1	Modelo bizantino: adversários bizantinos	14
2.1.2.3	Sumário	14
2.1.3	Arquitectura de Serviços de Segurança em RSSF	14
2.1.3.1	Requisitos de segurança de uma RSSF	15
2.1.3.2	Serviços de Segurança	16
2.2	Estudo de Protocolos de Encaminhamento Seguro para RSSF	18
2.2.1	Caracterização dos protocolos de encaminhamento em RSSF	18
2.2.2	<i>Secure Implicit Geographic Forwarding (SIGF)</i>	19
2.2.3	<i>INtrusion-tolerant routing protocol for wireless SEnsor Networks (IN-SENS)</i>	21
2.2.4	<i>Secure Sensor Network Routing: Clean-Slate approach</i>	22
2.2.5	Discussão	22
2.3	Modelo de Adversário, Ataques ao Encaminhamento e Contra-medidas	22
2.3.1	Ataques à organização da rede e descoberta de nós	23
2.3.1.1	Contra-medidas	23

2.3.2	Ataques ao estabelecimento de rotas	24
2.3.2.1	Contra-medidas	25
2.3.3	Ataques à manutenção de rotas	26
2.3.3.1	Contra-medidas	26
2.3.4	Discussão/Resumo	26
2.3.5	Aspectos em aberto e necessidade de avaliação experimental	26
2.4	Ambientes de Simulação	26
2.4.1	CrITÉrios de Selecção	27
2.4.1.1	Relacionados com Engenharia de Software	27
2.4.1.2	Relacionados com as RSSF	28
2.4.2	Prowler/JProwler	28
2.4.3	J-Sim	29
2.4.4	Freemote	29
2.4.5	ShoX	30
2.4.6	Discussão	31
2.5	Discussão e Resumo do Trabalho Relacionado	31
3	Abordagem à fase de elaboração da dissertação	33
4	Plano de trabalho	35

Lista de Figuras

1.1	Pilha de protocolos de um nó sensor	4
2.1	Modelo de um Sensor de uma RSSF (baseado em [?])	10

Lista de Tabelas

1 . Introdução

1.1 Introdução geral

Os recentes avanços no fabrico de *hardware* de pequena dimensão [44] com capacidades para desempenhar tarefas específicas e a diminuição do tamanho dos dispositivos de comunicação sem fios, fez surgir, nos últimos anos, um novo campo da investigação, as redes de sensores sem fios (RSSF). Uma rede de sensores é um conjunto de pequenos dispositivos de computação de baixa potência distribuídos num determinado ambiente, de forma autónoma¹ e auto-organizada, com a função de recolher sensorialmente (ou monitorizar) fenómenos² físicos. Um ambiente de execução pode ser um qualquer espaço onde uma RSSF possa ser instalada por exemplo: uma casa, um terreno de combate ou o próprio corpo humano.

A componente básica e fundamental de uma rede de sensores é o nó sensor (*mote*)[2, 1, 3]. Este pode conter diversos sensores para monitorizar, por exemplo, temperatura, luz ou movimento consoante as necessidades da aplicação. É caracterizado por ser pequeno, ter pouco poder de computação, ter baixa largura de banda de comunicação e ter energia limitada. Conhecidas estas limitações, os sensores têm de ser distribuídos em grande número como forma de aumentar a redundância, formando redes de larga escala que podem ir até aos milhares de nós.

Sendo o *hardware* de pequena dimensão e com características muito específicas para a tipologia de aplicações às quais se aplica, os *motés*, diferem uns dos outros consoante a sua função na rede e poderão desempenhar, fundamentalmente, dois papéis: nó genérico gerador de informação (*source-nodes*) e nó base ou de sincronização (nó colectador de dados da rede ou de execução de comandos de pesquisa)[REFERENCIA]. Outro papel, que pode ser desempenhado, numa RSSF é o de nós de interligação ou *gateways*. Estes permitem ligar as RSSF a outras redes ou a outras infraestruturas que, com maior capacidade de armazenamento e processamento, permitem efectuar análise de dados coligidos. Por fim, e não menos importantes, existem ainda os nós de desenvolvimento, que possuem ligações a computadores (ex: ligação de rede *ethernet*, RS232), podendo ainda funcionar, também, como nó *gateway*. [REFERENCIA] Assim, verifica-se que apesar das limitações existentes, inerentes às características do hardware e da sua aplicabilidade, os sensores, ao contrário do que acontece em redes convencionais,

¹Sem a necessidade de monitorização ou vigilância por parte de uma entidade externa

²Entidades ou características do interesse do observador

não se encarregam somente de processar informação, mas possuem tarefas fundamentais no encaminhamento da informação. Estas particularidades, existentes também nas redes *ad-hoc*, tornado-se num desafio ainda maior nas RSSF, uma vez que as suas características e limitações expõe algumas vulnerabilidades ao seu funcionamento.

1.1.1 Caracterização de RSSF

As redes de sensores sem fios são um caso especial de redes *ad-hoc* que exibem características específicas que podem ser diferenciadas[?]. As RSSF têm particular interesse, dada a sua adequação a aplicações de larga escala, uma vez que a participação de milhares de nós faz emergir algumas problemáticas inerentes a aplicações distribuídas [12] e aos seus mecanismos de gestão, como tolerância a falhas, escalabilidade e segurança. Os nós sensores são dispositivos de baixa potência, também denominados sensores inteligentes(*Smart Sensors*)[48], são constituídos por um ou mais sensores, por processador, por memória, por bateria e por um mecanismo de comunicação por rádio-frequência baseados em normas (802.15.4 [4, 8] e Zigbee[8]) com base de comunicação orientada para protocolos de acesso ao meio e de ligação de dados (*MAC/Data Link*) que podem apresentar características mais ou menos específicas (ex: B-MAC[39, 13], S-MAC[47, 13]).

No entanto, dadas as características de auto-organização/configuração, encaminhamento *multi-hop*, baixo custo, miniaturização e versatilidade de implementação (devido à não necessidade de infraestrutura adicional de comunicação entre nós)[48], o seu uso tem-se estendido a outros campos, nomeadamente os do domínio militar, segurança e medicina[6]. Consciente das limitações impostas pelas RSSF, todo o processamento e comunicação tem-nas sempre, já que qualquer tarefa desempenhada penaliza o consumo de energia (especial relevo para a comunicação, que consome muito mais energia do que o processamento). Com isto, a investigação centrada nas RSSF tem vindo a introduzir novos conceitos, a criar ou melhorar protocolos, a construir aplicações e a desenvolver novos algoritmos, com vista a ir ao encontro dos limites impostos pelas restrições das RSSF, traduzindo-se numa maior eficácia e na melhoria da sua utilização em inúmeras aplicações.

1.1.2 Aplicações

Muitas foram as aplicações encontradas para a utilização/exploração desta arquitectura distribuída de larga escala[48]. O carácter autónomo destas redes oferece um sem número de vantagens que propicia a sua utilização em locais remotos e sem necessidade de manutenção. Sendo assim, as aplicações poderão, genericamente, ser divididas nas seguintes classes de funções:

Detecção de alvos/objectos(*Target Tracking*): [43] Detecção de movimento (trajectória/presença) em áreas vigiadas (em teatros operacionais militares, na vigilância de infraestruturas);

Monitorização de fenómenos naturais: [28] Detecção de eventos ou anomalias ambientais (agricultura, poluição, *habitats* naturais), controlo de fenómenos naturais (sismos, vulcões);

Recolha de dados: [29] controlo de indicadores físicos de pessoas e animais (recurso a sensores especiais) normalmente associados a aplicações da medicina

1.2 Segurança em RSSF

A segurança nas RSSF é uma problema *de facto*, com impacto na sua aplicação em sistemas críticos. Como tal, deve ser pensada em toda a abrangência do sistema e tendo em atenção as particularidades específicas da tecnologia inerente e dos ambientes onde são implementadas. Assim, importa, antes de mais, analisar a plataforma genérica de uma RSSF, sobre o ponto de vista da sua pilha de protocolos, uma vez que cada uma das camadas representa um potencial ponto vulnerável a ataques. Neste momento não se pretende ser muito exaustivo na explanação das propriedades das camadas, visto que será alvo de descrição mais detalhada no decorrer deste trabalho.

Uma plataforma genérica possui uma pilha de protocolos mais simplista, comparada com a pilha de protocolos perconizada no modelo OSI[42], uma vez que as limitações impostas pelas dimensões e as capacidades de operação não permitem uma arquitectura mais ambiciosa. As camadas de operação de um nó sensor são essencialmente cinco[6]: camada física, camada de ligação de dados, camada de rede, camada de transporte e camada de aplicação. No que respeita à camada física um dos ataques mais efectivo é o *jamming*³[30], que pode ser mitigando usando mecanismos de salto de frequência. Ao nível da ligação de dados, sendo esta uma camada

³Transmissão de dados com o intuito de confundir e introduzir ruído na comunicação

responsável pelo estabelecimento das comunicações ponto a ponto, verifica-se que ataques do tipo de exaustão ou de introdução de colisões são também bastante efectivos e podem ser combatidos com limitação das taxas de emissão e uma boa política de resolução de colisões. Ao nível transporte os ataques dirigidos por comportamentos de inundação aumenta o congestionamento da rede, no entanto esta camada não se encontra muito presente na pilha uma vez que as operações que por ela poderiam ser realizadas acabam por o ser na camada de aplicação.

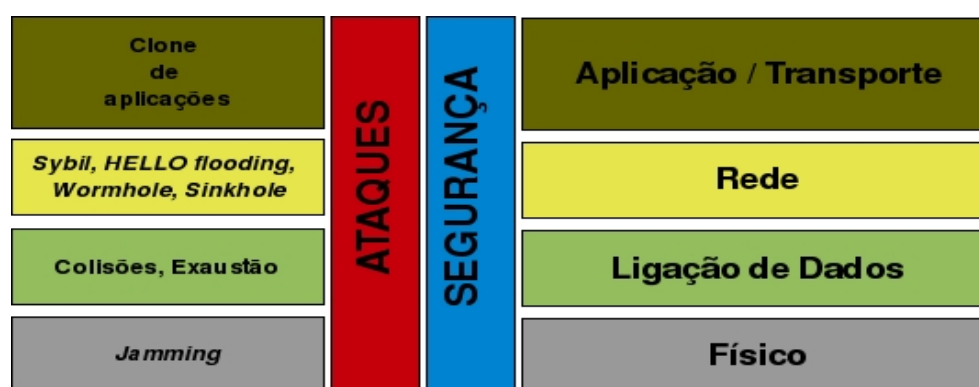


Figura 1.1 Pilha de protocolos de um nó sensor

No entanto a camada, na qual se pretende centrar a atenção, dentro do âmbito deste trabalho, é a camada de rede, responsável pelo encaminhamento dos dados numa RSSF. Nesta camada, as tipologias de ataques são essencialmente relacionadas com o meio de comunicação e com a intrusão. No primeiro tipo, os ataques verificados são os de introdução de informação de encaminhamento falsa, *wormhole*[19], *sybil*[16, 31] e *HELLO flooding*[25] e outros que serão mais detalhadamente apresentados à frente. No segundo caso e porque as RSSF têm características especiais (autonomia, auto-organização e localização remota) que as tornam susceptíveis a uma nova tipologia de ataques, tem-se os ataques por intrusão e captura de nós, materializados pelo ataque físico ao sensor, que possibilita a usurpação de material criptográfico, bem como a replicação de nós maliciosos[33] que podem induzir comportamentos incorrectos, quer no protocolo, quer na aplicação.

Perante este cenário de novas ameaças, alguns autores têm vindo a desenhar algoritmos com vista a minimizar o impacto destes ataques na operação das RSSF. Estes algoritmos, efectivos com a especificação de protocolos de encaminhamento, com o intuito de garantir algumas

propriedades de segurança[40] (ex: confidencialidade, integridade, autenticação, frescura) tem vindo a surgir na literatura. Importa, portanto, salientar os que irão ser alvo de estudo neste trabalho e que de uma forma geral correspondem ao estado da arte em matéria de segurança e de encaminhamento seguro em RSSF: *Secure Implicit Geographic Forwarding*(SIGF)[45], *INtrusion-tolerant routing protocol for wireless SEnsor NetworkS* (INSENS)[14] e *Secure Sensor Network Routing(Clean-Slate)*[35]. A selecção destes protocolos deve-se também ao facto de poderem ser enquadrados em diferentes classes de protocolos de encaminhamento (ex: hierárquicos, baseados em localização, *on-demand*[7], *table-driven*[7]), bem como o facto de terem diferentes mecanismos para fazer face aos ataques e, na generalidade, não protegerem contra todas as tipologias de ataques. O protocolo SIGF caracteriza-se por ser um protocolo inspirado num já existente, o IGF[9], incorporando neste, mecanismos de segurança. Por se tratar de um protocolo *on-demand*[7]⁴ e configurável, consegue estabelecer medidas de segurança adaptadas às necessidades da aplicação perante um ataque. Distingue-se do protocolo INSENS[14] porque este último é, em especial, orientado para a resiliência a ataques por intrusão, não descuidando os ataques ao meio de comunicação. É baseado na construção de tabelas de encaminhamento, portanto da classe *table-driven*⁵[7], para além disto, deposita num nó base ou de sincronização um papel importante na criação e certificação das tabelas de encaminhamento, o que lhe permite implementar um sistema de multi-caminhos que o torna tolerante a intrusões. Por fim, o protocolo *Clean-Slate*⁶[35] que procura abordar os conceitos principais para o desenho protocolos de encaminhamento seguro: prevenção, detecção/recuperação e resiliência. Assim, este protocolo pretende conseguir alta segurança, com alta disponibilidade, isto sem recorrer a *hardware* adicional e com o mínimo consumo de recursos.

Actualmente têm surgido muitos protocolos de encaminhamento para RSSF. Todavia, não conseguem endereçar todas as tipologias de ataques, assumindo, cada um, o compromisso de resistir a determinados ataques e garantir algumas propriedades de segurança tendo em vista a sua utilização em aplicações específicas. Dia após dia, com a generalização do uso das RSSF, com o baixo custo, com o carácter autónomo e a não necessidade de infraestrutura de comunicação, o estudo de protocolos de encaminhamento seguro por forma a avaliar os comportamentos das RSSF perante ataques e como estes influenciam a energia, fiabilidade e latência da rede.

⁴Em que as rotas são definidas a quando da comunicação

⁵Algoritmos que se baseiam numa tabela de encaminhamento que é mantida através da troca de mensagens de controlo por forma a manter a sua consistência em todos os nós da rede

⁶Esta designação deve-se ao facto do protocolo não ter um nome específico mas, partir de uma abordagem de raiz para a garantia de segurança

Apesar do baixo custo do *hardware* a sua utilização em fases de investigação e desenho de protocolos torna-se impraticável, uma vez que dificilmente se consegue manter as mesmas condições de simulação. Considerando também, que o tempo útil de vida da rede é limitado, a utilização de sensores reais põe entraves relativos com os custos, já que os nós teriam de ser substituídos regularmente. Para suprir estas limitações surge a necessidade de conceber sistemas de simulação de RSSF. O que se tem vindo a verificar é que, para cada problema cria-se uma ferramenta que permita testar/avaliar o problema específico. No entanto, existem determinados modelos que são transversais a qualquer protocolo de encaminhamento que se queira avaliar, por exemplo: consumo de energia, taxa de cobertura, fiabilidade, escalabilidade. No domínio do estudo da segurança em RSSF, não existe uma plataforma que permita modelar protocolos de encaminhamento seguro enformados pelos ataques mais comuns dirigidos a estas redes, de forma simples, em que só se esteja centrado no desenho do protocolo, permitindo a introdução de ataques de forma controlada. Aliada a esta necessidade, surge também a necessidade de obter medições e resultados referentes a condições de execução das redes, que permitam afinar os protocolos mediante os resultados obtidos e a repetição de experiências nas mesmas condições.

1.3 Objectivos e contribuições previstas para a dissertação)

Conhecidas que estão as dificuldades existentes no estudo de protocolos de encaminhamento seguro, nomeadamente no que se refere à existência de um sistema de simulação de RSSF de larga escala, apresenta-se como desafio pertinente de se ver ultrapassado. Um sistema que suprima estas dificuldades, contribui para um mais rápido desenvolvimento e uma afinação mais cuidada de determinados parâmetros dos protocolos com vista a garantir as propriedades de segurança desejadas para o ambiente de operação das RSSF.

No âmbito do trabalho que se pretende desenvolver na elaboração da dissertação, ao qual se refere este relatório, pretende-se conceber e desenvolver um sistema de simulação inovador, e pelo que consta inexistente de forma integrada, que permita o estudo sistemático de protocolos de encaminhamento, desenhados com o intuito de providenciar mecanismos de segurança, que possua em particular as seguintes funcionalidades:

- Interface de visualização e configuração da rede, nomeadamente, com informações dos parâmetros de simulação e informação detalhada de cada nó, bem como o estado energético e o grau de ameaça a que está sujeito.

- Implementação de um modelo de energia que permita extrair consumos em diferentes momentos de operação: operação normal e perante determinado ataque.
- Motor de geração de topologias, sabendo que as topologias da rede podem ter influência no seu comportamento, introduz-se esta funcionalidade como forma de distribuir os nós de diversas formas na área de monitorização: distribuição aleatória, distribuição em grelha, distribuição controlada (estruturada).
- Mecanismos de introdução de falhas/ataques na rede. Com este mecanismo pretende-se capacitar o autor, de determinado protocolo, da possibilidade de introduzir ataques tipificados (ex: ao meio de comunicação ou intrusão) e de provocar mutação de código, com vista a induzir alterações no comportamento do protocolo.
- Utilitários de recolha de dados da simulação, em tempo real e em tempo diferido, que permitam a extracção de medições referentes a propriedades importantes como consumos de energia, latência, fiabilidade, correcção do protocolo e correcção dos eventos, disponibilizando-os de forma gráfica.

1.4 Principais contribuições e a sua avaliação

Atingido o objectivo proposto de concepção de um ambiente de simulação que permita a avaliação/análise de protocolos de encaminhamento seguros em RSSF, pretende-se avaliar, com recurso a este ambiente alguns protocolos de encaminhamento existentes, nomeadamente os já indicados para estudo. Sendo este estudo uma contribuição, não só para a certificação da usabilidade do sistema, bem como para a complementariedade do estudo de cada um dos protocolos e verificação das propriedades enunciadas pelos autores, no que concerne à segurança. No que respeita à avaliação do ambiente em si e à sua utilização como ferramenta de estudo desta problemática, com a implementação de algoritmos de encaminhamento, será possível criar alguma sensibilidade para a efectividade e facilidade de utilização da plataforma para o desenvolvimento e estudo de protocolos de encaminhamento em RSSF em geral, e os que se revestem de preocupações de segurança, em particular.

2. Trabalho relacionado

Compete, neste capítulo, explanar o estado da arte em cada uma das vertentes do trabalho, por forma a sustentar a discussão da adequabilidade da solução proposta. Sabendo que a componente de análise crítica é de indispensável presença num trabalho científico, procurar-se-á, sempre que oportuno, acompanhar as explicações com uma interpretação técnica, como forma de justificar as opções efectuadas face panóplia de alternativas existentes na academia.

2.1 Desenho e Implementação de RSSF Seguras

Sendo o tema central do trabalho proposto o estudo das propriedades de segurança nestas redes, importa, em primeiro lugar, perceber, de forma consistente, a sua arquitectura de protocolos. Em segundo lugar, é necessário entender quais os serviços de segurança disponibilizados, por forma a poder adequar-se às aplicações para as quais são criadas e desenhadas as RSSF.

2.1.1 Arquitectura de uma RSSF

As redes de sensores têm uma arquitectura considerada minimalista porque, ao contrário de outras arquitecturas de redes, estão organizadas em menos camadas, fundindo algumas funções desempenhada por camadas inferiores para outras superiores (ex: a camada de aplicação pode desempenhar algumas funções da normalmente atribuídas à camada de transporte). Assim, é fundamental perceber qual a pilha de protocolos que as RSSF implementam, bem como perceber quais os sistemas que compõem um sensor genérico para de seguida apresentar algumas implementações de sensores.

2.1.1.1 Modelo da plataforma genérica de uma RSSF - *Mote*

À semelhança do que acontece com as redes convencionais, existem nós de computação interligados por uma infraestrutura de comunicação. No caso da RSSF, esta infraestrutura corresponde a comunicação *multi-hop* em que cada nó da rede (*mote*) pode desempenhar pelo menos três papéis: 1) Nó gerador de dados, pela captação da eventos associados às especificidades dos sensores possuídos; 2) Nó encaminhador, que recebe dados de outros nós e os passa a outros nós por forma a que alcance o destino; 3) Nó de sincronização ou nó de agregação, embora estas

duas caracterizações não correspondam à mesma tarefa por si só, a um nível mais macro, corresponde igualmente a colecção de dados da rede oriundos da detecção de eventos, por forma a fazê-la seguir agregada para outro destino (interno ou externo à rede).

Desta forma interessa perceber qual o modelo inerente a estas pequenas plataformas de rede que apesar das características limitadoras da sua execução conseguem executar uma complexidade de aplicações tendo em conta sempre as limitações impostas pela arquitectura. Na figura seguinte apresent-se um modelo [?] que ilustra os diversos componentes que concorrem para a efectividade de serviço de um *mote* numa RSSF.

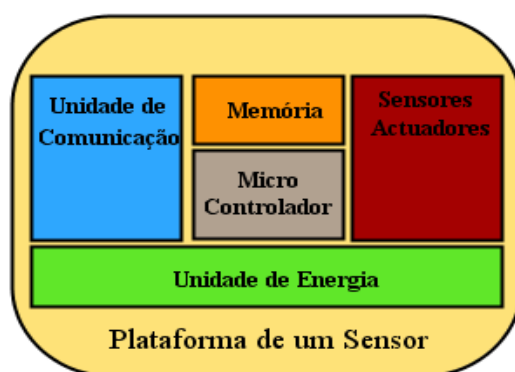


Figura 2.1 Modelo de um Sensor de uma RSSF (baseado em [?])

Como se pode observar pela figura, da qual se pode generalizar o modelo de uma plataforma genérica de RSSF, os sistemas que estão presentes são os seguintes: i) Sistema de processamento; ii) Sistema de energia; iii) Sistema de comunicação; iv) Sistema sensorial; v) Sistema de memória.

2.1.1.2 Pilha de Protocolos de uma RSSF

Uma arquitectura para a pilha de protocolos em RSSF foi proposta por [6], esta pilha apresenta-se representada por cinco camadas: física, ligação de dados, rede, transporte e aplicação. Tendo em conta as características das RSSF, toda a pilha é acompanhada transversalmente por três planos, que devem ser atendidos por cada uma das camadas, de forma a lidarem de forma optima com a energia, mobilidade e recursos partilhados, e estes são os seguintes: plano de gestão de tarefas , plano de gestão de energia e plano de gestão de mobilidade.

Camada Física Esta camada é responsável por selecção de frequência, detecção de sinal e modulação, podendo ainda desempenhar algumas tarefas de encriptação. A minimização do consumo de energia é uma prioridade, as restantes tarefas assemelham-se às restantes redes sem fios. [6].

Camada de Ligação de Dados Das tarefas associadas a esta camada destacam-se as seguintes: multiplexação de dados, acesso ao meio, detecção de erros e detecção de frames. Uma RSSF tem um protocolo de MAC específico de modo a atender o consumo de energia e os protocolos centrados nos dados. Assim sendo e porque os ambientes de operação têm ruído e os sensores podem ser móveis, o protocolo de acesso ao meio (MAC) tem que lidar com os constrangimentos de energia por forma a minimizar colisões a quando do *broadcast* com os vizinhos[6].

Camada de Rede Sendo a energia um tema transversal a toda a pilha esta camada deve endereçar esta preocupação também. No entanto, o facto das RSSF serem essencialmente centradas nos dados, sensíveis à localização e com endereçamento baseado em atributos faz com que estes assuntos sejam também atendidos por esta camada[6]. Repare-se que se a camada de ligação de dados se preocupa com a comunicação entre dois quaisquer nós, a camada de rede deve decidir quais os nós a escolher. Um dos sistemas de encaminhamento mais simples é o baseado na inundação (*flooding*), no entanto, apesar da simplicidade não tem alguns problemas como por exemplo: a duplicação de mensagens e a total ignorância dos recursos da rede, nomeadamente os energéticos, pois se um evento é detectado por mais que um sensor essa informação vai enundar em duplicado pela rede. Um dos protocolos que minimiza o impacto da inundação é o SPINS[?], negociando e adaptando-se aos recursos existentes.

Camada de Transporte Nas redes convencionais a camada de transporte está responsável pela transmissão numa base ponto a ponto. Assim, uma das tarefas importantes a apontar é a de gestão da congestão de tráfego na rede, gestão da fiabilidade da comunicação[?][24].

Camada de aplicação Várias são as aplicações ou protocolos desenvolvidos para a camada aplicação normalmente estão associadas às capacidades sensoriais das plataformas, que naturalmente estão relacionadas com o fim para o qual se instala/desenha a RSSF. Alguns dos protocolos para camada aplicação referidos na literatura [6] são os seguintes: *Sensor Management Protocol* (SMP)[?] e *Task Assignment and Data Advertisement Protocol* (TADAP)[?], realça-se no entanto, que nesta área ainda existe muito caminho por percorrer e explorar.

Note-se no entanto que na implementação de alguns protocolos para RSSF algumas camadas não estão presentes por exemplo um protocolo como o LESOP[?] as camadas de rede e transporte não são consideradas por forma a simplificar a pilha de protocolos em *motes*. Esta é uma das capacidades destas redes, que corresponde ao facto de adequar de forma específica a infraestrutura às necessidades de determinada aplicação.

2.1.2 Modelo de Adversário e Serviços de Segurança

Quando se tratam de questões de segurança, qualquer se seja o seu domínio, existe uma primeira pergunta que cumpre fazer: “quais são as ameaças/ataques a que está sujeito o objecto que se pretende manter seguro?”. Esta pergunta possibilita, desde logo, encetar uma caminhada que visa a identificação de quais os possíveis atacantes, que capacidades estes possuem, quais os meios e modos que estes podem utilizar e em que momento o ataque se pode desencadear. Esta abordagem, um tanto ou quanto generalista, é suficiente para ilustrar a forma como se pretende orientar o estudo e com isto apresentar, nas mesmas vertentes, o modelo de adversário que enforma este trabalho.

2.1.2.1 Modelo de Dolev-Yao

Um dos modelos de adversário mais conhecidos, quando se trata de análise formal de protocolos seguros, é o modelo de Dolev-Yao [15]. Assim, neste modelo, é considerado que a rede está sobre o domínio do adversário, que perante este facto pode extrair, reordenar, reenviar, alterar e apagar as mensagens que circulam entre quaisquer dois principais legítimos. Com esta assumpção, entende-se portanto, que o adversário transporta a mensagem e com isso adopta um ataque do tipo *man-in-the-middle*[], com comportamento incorrecto, que o leva a poder alterar o destinatário, atribuir uma falsa origem, analisar o tráfego ou alterar as mensagens. Este funcionamento, entenda-se, não é comparado à intrusão mas sim à interceptação de mensagens que pode ser mitigado usando mecanismos de criptografia.

As tipologias de ataque, consideradas pelo o modelo de adversário de Dolev-Yao são instanciadas pela norma X800 [23] que pretende normalizar uma arquitectura de segurança para o modelo OSI, oferecendo uma abordagem sistemática para o desenho de sistemas seguros. Esta norma considera a segurança sobre três aspectos: ataque, mecanismo e serviço de segurança[?]. O primeiro refere-se à forma usada para comprometer um sistema, por exemplo, alterando ou tendo acesso não autorizado autorizado a dados desse sistema. Na literatura, algumas vezes

usam-se os termos ataque e ameaça para denominarem o mesmo efeito, no entanto recorrendo ao RFC 2828 [?] podemos definir ameaça como uma potencial violação de segurança, ou seja é apenas uma possibilidade que pode ser usada para desencadear um ataque explorando uma vulnerabilidade; no caso do ataque, trata-se da exploração inteligente de uma ou mais ameaças que resultam na violação com sucesso de um sistema que se pretendia seguro. O segundo aspecto considerado, na norma X.800, são os mecanismos de segurança, que se entende como o processo que permite detectar, prevenir ou recuperar de uma ataque à segurança (ex: encriptação, controlo de acesso, assinatura digital)[?]. Por fim, o terceiro aspecto define os serviços que, fazendo uso de um ou mais mecanismos de segurança, permitem resistir a ataques dirigidos a determinada fonte de informação, quer seja durante o processamento ou durante a comunicação.

2.1.2.2 Modelo de Intrusão em RSSF

Considerando o estudo de segurança numa RSSF, e dada a sua exposição natural, nomeadamente a física, colocando cada sensor ao alcance de um qualquer adversário, torna relevante a consideração de novos modelos de ataque. Considerando que cada rede pode ser constituída por milhares de sensores, cada um deles é um ponto de ataque, na impossibilidade de se proteger ou monitorizar todos os sensores instalados[38]. Assim as RSSF vêm-se sujeitas a um modelo de adversário que difere das redes com/sem fios convencionais. Um adversário pode estar perto da rede e ter acesso aos sensores e com isto “roubar” um ou parte dos sensores da rede com vista a explorar os segredos ou material criptográfico usados para a comunicação. Podemos então tipificar estes ataques como sendo por intrusão. Este tipo de ataques podem ser definidos por ataques desde o nível MAC[46] até ao nível de intrusão física em que um actor externo, tendo acesso a um ou mais sensores legítimos, descobre os segredos criptográficos permitindo-lhe replicar[34] os segredos para sensores maliciosos, que depois de introduzidos podem agir de forma coordenada comprometendo a rede. Conseguida a intrusão, o atacante pode induzir nos sensores legítimos comportamentos incorrectos baseados na informação falsa introduzida pelos sensores maliciosos, influenciando o processo de encaminhamento (denominados de ataques ao encaminhamento). Note-se, por exemplo, que estes ataques têm características que os tornam difíceis de identificar quando instalados numa rede, uma vez que o carácter autónomo das RSSF, torna difícil distinguir um comportamento errado de uma falha. Um sensor malicioso pode respeitar o protocolo da rede, no entanto podem actuar de forma incorrecta levando a rede

a criar topologias específicas para o ataque (por exemplo, criando partições) ou fazendo, por exemplo, toda a informação passar pelos nós maliciosos, suprimindo ou violando a informação. No que se refere aos ataques direccionados ao encaminhamento, por serem parte do objectivo do estudo deste trabalho, encontram-se definidos na próxima secção e são essencialmente instanciados pela participação colaborativa ou isolada de nós introduzidos com o intuito de afectar o normal funcionamento da rede.

2.1.2.2.1 *Modelo bizantino: adversários bizantinos*

2.1.2.3 Sumário

Mediante as vulnerabilidades de uma RSSF, é necessário estabelecer um modelo de adversário com vista a poder mapear as capacidades e tipologias de ataques deste em mecanismos de segurança com o propósito de lhes poder resistir ou mitigá-los. O modelo de Dolev-Yao é o modelo de facto quando se trata da análise de ameaças a redes, em que o meio de comunicação está sobre controlo do adversário. No entanto, tratando-se de RSSF, este modelo por si não se vislumbra suficiente para abarcar todas as problemáticas de segurança a que este tipo de redes está sujeita. Surge assim a necessidade de, face à insegurança que cada nó da rede representa, estender este modelo acrescentando-lhe um modelo de intrusão. Perante a exposição das RSSF, os ataques que se podem desencadear podem ser diferentes dos observados nas redes convencionais sendo assim necessário considerar outras tipologias de ataques. Assim, podemos classificar os ataques como activos e passivos [41] e os atacantes como internos e externos[25]. Nestes ultimos ainda se pode classificar quanto aos recursos usados como *sensor-class* ou *laptop-class*[25]. Os ataques que se consideram para o estudo e relacionados com as RSSF são: falsa informação de encaminhamento, *blackhole*, *sinkhole*, *wormhole* e *sybil attack*[16].

2.1.3 Arquitectura de Serviços de Segurança em RSSF

Muitas vezes considera-se que num sistema seguro, a segurança é um único componente da arquitectura do sistema[?]. Todavia, esta visão é redutora, pois, para se conseguir um sistema seguro, é necessário que a segurança esteja integrada em cada um dos componentes, se assim não se verificar cada componente pode corresponder a uma ameaça a partir da qual se pode desencadear um ataque.

Os desafios propostos pelas RSSF são específicos da própria tecnologia, assim sendo os mecanismos tradicionais de segurança podem não ser suficientes. Com isto surgem tecnologias que visam corresponder aos requisitos de segurança das RSSF. Assim, nesta secção pretende-se apresentar uma visão sobre os requisitos de segurança de uma RSSF e como estes são atendidos usando alguns serviços de segurança mais populares.

2.1.3.1 Requisitos de segurança de uma RSSF

Embora se apresente os requisitos de segurança de uma RSSF, estes requisitos podem variar consoante as especificidades da aplicação que a rede visa suportar. Por exemplos se se tratar de uma aplicação de monitorização de saúde uma pessoa, o óbvio é proteger a privacidade da pessoa, mas se se tratar de uma aplicação de monitorização de dados ambientais este requisito pode ser relaxado.

De seguida apresentam-se, de forma genérica, os principais requisitos de segurança de uma RSSF:

Autenticação Considerando que as RSSF usam um meio de comunicação partilhado, é necessário recorrer à autenticação para garantir a detecção de mensagens alteradas ou injectadas no sistema com o intuito de obter acesso a alguma operação ou informação que é restrita a utilizadores não autorizados[?]. No que respeita a autenticação o requisito pode ter dois sentidos: autenticação da origem das mensagens (garantindo que a mensagem é gerada por quem se apresenta como sendo a origem) e autenticação dos dados (garantindo que os dados recebidos são exactamente os enviados). Note-se que a implementação de criptografia assimétrica pode contribuir para a garantia desta propriedade, mas ainda existe muito esforço a desenvolver neste campo dadas as limitações das RSSF e as exigências computacionais e energéticas destes mecanismos.

Confidencialidade Sendo a RSSF uma infraestrutura baseada fundamentalmente na disseminação de dados recolhidos a partir de sensores que se encontram distribuídos em ambiente não controlado e, normalmente, de fácil acesso, pode ser necessário garantir a confidencialidade dos dados que circulam na rede. Assim, o uso de mecanismos de criptografia é o mais usado para protecção de dados em comunicação ponto-a-ponto. O uso de criptografia por si só pode não ser suficiente, uma vez que um ataque pode fazer análise dos dados que circulam na rede (fazendo uma análise de padrões) e com este conhecimento violar as chaves que servem de base ao mecanismo. Desta forma, a utilização de algoritmos de

encriptação fiáveis (ex: AES, ECC) para garantir um determinado nível de segurança, para isso existe a necessidade de partilhar chaves de sessão por todos os *end-points* e como tal deve-se recorrer a esquemas de distribuição de chaves.

Disponibilidade Para que consiga atingir um bom nível de disponibilidade é necessário garantir que uma RSSF funcione normalmente durante todo o seu tempo de implementação. Os ataques de negação de serviço (Denial of Service - DoS) são os mais frequentes para atingir a disponibilidade de uma rede. Para além de mecanismos que evitem a negação de serviço, é preciso garantir que a forma de degradação da rede (na presença de um ataque) seja controlada e que a degradação vá sendo tão grande quanto maior sejam o número de nós afectados.

Integridade Durante a comunicação a integridade garante que os dados recebidos pelo nó receptor não foram alterados por um adversário durante a transmissão. Em alguns casos esta propriedade é garantida juntamente com a autenticação, usando mecanismos que permitam verificar ambos apenas com um mecanismo, poupando assim recursos, que são escassos nas RSSF. Por exemplo, o uso de HMAC's é vulgar uma vez que a chave é usada para autenticar a origem da mensagem e para garantir a integridade da mensagem, ou seja se a mensagem for alterada a origem não poderá ser correctamente verificada, pelo que a mensagem acaba por ser ignorada[?].

Frescura A frescura dos dados de uma mensagem implica que estes sejam recentes garantindo que esta mensagem não é antiga e não foi reenviada por um qualquer adversário. [?] Podem-se considerar dois tipos de frescura: frescura fraca (garantindo ordem parcial e sem informação do desvio de tempo, usada para as medições dos sensores) e frescura forte (garante ordem total em cada comunicação permitindo a estimação do atraso, usada para a sincronização de tempo).

2.1.3.2 Serviços de Segurança

TinySec[26] TinySec é uma arquitectura de segurança para protecção ao nível de ligação de dados em RSSF. O objectivo principal, para o qual foi desenhado, é providenciar um nível adequado de segurança com o mínimo consumo de recursos. Os serviços de segurança disponibilizados são: autenticação de dados (com a utilização de *Message Authentication Codes*(MAC), no caso CBC-MAC¹) e confidencialidade (a encriptação é implementada

¹Cipher Block Chaining - Message Authentication Code (CBC-MAC))

com o recurso também ao CBC-MAC). Note-se que a frescura das mensagens não foi endereçada nesta arquitectura, uma vez que os autores consideram como demasiado exigente em termos de recursos, o que contrariaria o objectivo principal da arquitectura.

MiniSec[27] Minisec é uma camada de rede concebida para possuir o melhor dos dois mundos: baixo consumo de energia e alta segurança. Esta arquitectura tem dois modos de operação: uma baseado para comunicação *unicast* (MINISEC-U) e outro para *broadcast* (MINISEC-B). Sendo que a segunda não necessita de manter o estado por cada emissor por forma a proteger o reenvio escalando para grandes redes.

SPINS[?] É um conjunto de protocolos de segurança, constituído por dois componentes principais SNEP² [?] e μ TESLA [?]. O primeiro, fornece serviços de autenticação e confidencialidade entre dois pontos de comunicação, encriptando as mensagens e protegendo-as com um MAC. O SNEP gera diferentes chaves, de encriptação, que derivam de uma chave mestra partilhada entre os dois nós, ainda é incluído um contador nas mensagens para garantir a frescura. A encriptação é realizada com o modo CTR³ e a autenticação com CBC-MAC. O segundo componente, o μ TESLA, é um serviço de autenticação de *broadcast*, que evita a utilização de mecanismos, mais exigentes, de criptografia assimétrica, recorrendo a criptografia simétrica, autenticando as mensagens com um MAC,

Norma IEEE802.15.4[4] Esta norma define a especificação da camada física e de controlo de acesso ao meio das redes pessoais de baixa potência (*Low Rate Personal Area Networks*). Foca-se essencialmente na comunicação de baixa potência entre dispositivos relativamente próximos, sem a necessidade de uma infraestrutura de suporte, explorando o mínimo de consumo de energia. É a norma que já se encontra implementada em algumas plataformas das RSSF. (ex: XXX, XXX). No que se refere a segurança[8], esta norma, especifica alguns serviços que acabam por representar uma primeira linha de protecção contra ataques à infraestrutura. Estes mecanismos são os seguintes: i) Cada dispositivo mantém uma lista de controlo de acesso (ACL) com os dispositivos confiáveis com o intuito de filtrar comunicações não autorizadas; ii) Encriptação de dados, com a partilha de uma chave entre os intervenientes na comunicação, guardada juntamente com cada entrada da lista de ACL's; iii) Serviço de integridade de cada *frame*, adiciona a cada frame uma *Message Integrity Code* (MIC)[?]; iv) Mecanismo de frescura de mensagens (*Sequential Freshness*), utilizando o contador de frames e o contador de chaves para garantir

²Secure Network Encryption Protocol

³Counter Mode

a frescura das mensagens evitando ataques do tipo *replaying* (reenvio).

ZigBee[8, ?] Com a especificação da norma 802.15.4 orientada para as duas camadas mais baixas da pilha de protocolos das RSSF (física e MAC) surge a norma ZigBee que pretende definir as especificações para a camada de rede e aplicação. Esta norma é implementada em plataformas de RSSF, com as características inerentes (baixo custo, baixo consumo e baixa potência). Já incorpora alguns serviços de segurança, nomeadamente: i) Frescura, mantendo contadores associados a cada chave de sessão, que são reiniciados em cada mudança de chave; ii) Integridade, com opções de integridade de mensagens que vão desde os 0 aos 128 bits de verificação de integridade de mensagens; iii) Autenticação, ao nível de rede é garantida com a utilização de uma chave de autenticação, ao nível de ligação são usadas chaves entre os dois pontos de comunicação; iv) Confidencialidade, usa o algoritmo AES⁴[?] com 128 bits.

2.2 Estudo de Protocolos de Encaminhamento Seguro para RSSF

Como ponto introdutório da discussão e apresentação de algoritmos de encaminhamento em RSSF, começa-se por identificar algumas tipologias destes algoritmos. As definições das tipologias normalmente estão relacionadas com a natureza destas redes e ao mesmo tempo outras foram herdadas das redes *ad-hoc*.

2.2.1 Caracterização dos protocolos de encaminhamento em RSSF

Podem-se estabelecer três classes de protocolos[5]: os baseados na localização, os centrados nos dados e os hierárquicos. Os protocolos baseados na localização usam esta informação para tomarem as melhores decisões para alcançar os destinos(ex: IGF[?]). Os centrados nos dados, ou seja, os que exploram a redundância e a semântica dos dados, normalmente são baseados em algoritmos que efectuem pesquisas lançadas a partir de nós de sincronização(ex: Directed Diffusion[22]). Por fim, os protocolos hierárquicos, cuja concepção é baseada na construção de grupos de nós, normalmente definidos como *clusters*(ex: LEACH[17]), que funcionam no princípio de agregação de dados do grupo e transferência para nós base.

Para além destas classificações podemos ainda considerar algoritmos quanto ao momento

⁴Advanced Encryption System algorithm

em que estes computam a informação relativa ao caminho entre a origem e o destino [7]. Pode-se considerar os protocolos *table-driven* ou *on-demand*. Os primeiros referem-se a protocolos em que durante o funcionamento são trocadas mensagens por forma a manter-se as tabelas de encaminhamento actualizadas em todos os nós da rede. No entanto, esta troca de mensagens pode ser prejudicial para as RSSF pois implica um maior uso da comunicação, logo maior dispêndio de energia, apesar disto, se a rede for estática e as alterações não forem frequentes, pode ser menos penalizador. No caso dos protocolos considerados *on-demand*, ou seja, a pedido, como o próprio nome indica, as rotas são estabelecidas quando é necessário desempenhar a função de encaminhamento de mensagens. Apesar de representar alguma sobrecarga no algoritmo, pode ser compensador em redes mais móveis e com eventos espaçados. Estas são algumas das características consideradas no desenho de algoritmos de encaminhamento em RSSF. No entanto, se se tratar de utilização em ambientes críticos é necessário que se considere as propriedades de segurança. Alguns destes protocolos não foram concebidos inicialmente com estas propriedades como preocupação.

Muitos dos protocolos de encaminhamento para RSSF não foram desde logo concebidos tendo em conta o factor de segurança[25], antes, pretendiam adaptar-se ao ambiente das aplicações e às características e capacidades das RSSF. As restrições impostas pelos sensores nomeadamente em termos de energia e alcance das comunicações sempre centraram a atenção no desenho de protocolos para estas redes. No entanto, quando se pretende estender a sua utilização para outros domínios, cuja segurança se apresenta como um atributo indispensável, estas preocupações ainda se agudizam mais, uma vez que os mecanismos de segurança implicam directamente um aumento da computação, tendo repercussões na autonomia, já de si limitada, dos sensores. Nesta secção apresentam-se alguns protocolos de encaminhamento seguro em RSSF, que se pretende que cubram todo o espectro da temática deste trabalho e que apresentem no seu todo os mecanismos de segurança que se pretende estudar, ainda que cada um per si possa apresentar lacunas quando sujeitos a determinados ataques característicos das RSSF.

2.2.2 Secure Implicit Geographic Forwarding (SIGF)

Conhecida a inexistência de mecanismos de segurança em alguns dos algoritmos de encaminhamento de RSSF, uma das possibilidades vislumbradas por determinados autores foi a realização de melhoramentos em algoritmos existentes implementando mecanismos de segurança, um destes casos foi o algoritmo de encaminhamento *Implicit Geographic Forwarding* (IGF)[?],

baseado na localização (cada nó conhece as suas coordenadas de localização no ambiente). Este algoritmo não mantém o estado ao longo do seu funcionamento, este facto faz com que funcione sem que seja necessário conhecimento da topologia da rede ou a presença de outros nós, logo, poderemos também classificá-lo também como um protocolo *on-demand*. O protocolo IGF, devido ao seu carácter não determinístico de encaminhamento, pois é decidido no momento da transmissão o próximo vizinho para quem encaminhar a mensagem, já representa uma mais valia para a segurança perante determinados ataques, mas, não é de forma alguma suficiente para manter uma aplicação, com requisitos de segurança, a executar em ambientes críticos.

Funcionamento do protocolo IGF Ao instalar uma aplicação, baseada no protocolo IGF, sobre uma infraestrutura de um RSSF o ambiente estará definido por coordenadas que permitam a cada nó saber exactamente a sua localização em cada momento. Ao agregar componentes de encaminhamento e MAC⁵ num único protocolo *Network/MAC* é possível[?], no momento de envio do pacote, determinar qual o melhor próximo vizinho (definido no protocolo como candidato). O protocolo inicia com a origem a enviar uma mensagem do tipo *Open Request To Send* (ORTS) para a vizinhança (esta mensagem contém a localização e o destino). Cada nó que se encontre no sextante válido (correspondente a um ângulo de 60° centrado na origem), determinado por cada nó com base na sua localização, inicia um temporizador de CTS (*Clear To Send*) inversamente proporcional com determinados parâmetros (distância à origem, energia existente, e distância perpendicular ao destino), favorecendo os nós com melhores condições a responderem com CTS. Ao expirar o temporizador, é respondida uma mensagem de CTS, sendo emitida uma mensagem do tipo DATA a partir da origem, após a recepção do CTS. Como este protocolo não mantém estado, resiste a mudanças de topologia da rede, o facto de escolher em cada envio o nó seguinte constitui um mecanismo de tolerância a falhas e mesmo em caso de ataque os danos ficam confinados à vizinhança de cada nó comprometido.

Especificação do protocolo SIGF[45] Com a introdução de mecanismos de segurança é natural a introdução de sobrecarga num protocolo, principalmente quando se trata da extensão de um já existente. No entanto, o protocolo SIGF[45] não pretende manter um bom desempenho e uma elevada taxa de sucesso de entrega das mensagens mesmo durante um ataque. Uma das novidades deste protocolo é o facto de ser configurável e como tal se adaptar os mecanismos de segurança ao grau de ameaça. O protocolo tem três extensões

⁵Medium Access Control

ao protocolo IGF[?] que permitem evoluir gradualmente de um protocolo sem estado para um protocolo, tradicional, com manutenção de estado, e com isto mais pesado e exigente em recursos.

Considerando a primeira extensão e portanto a mais simples e menos exigente em recursos, o SIGF-0 continua a não manter o estado e a ter um carácter não determinístico no entanto não sucumbe a ataques do tipo *rushing*[21] por não emitir logo para o primeiro CTS mas sim manter um conjunto de possíveis candidatos para o próximo nó. A extensão intermédia, SIGF-1 já mantém estado, mas ao nível local, podendo com isto constituir listas de reputação dos seus vizinhos por forma a escolher melhor o próximo nó. Por fim, e tratando-se já de um protocolo mais robusto, mas mais exigente, o SIGF-2 partilha o estado com os seus vizinhos permitindo usar mecanismos criptográficos, fornecendo propriedades de integridade, autenticidade, confidencialidade e frescura. Este último protocolo, ainda assim, herda as propriedades de configuração de cada um dos seus protocolos antecessores SIGF-0 e SIGF-1.

Mecanismos de Segurança e Resistência a ataques

2.2.3 *INtrusion-tolerant routing protocol for wireless SEnsor NetworkS* (INSENS)

Este protocolo [14] foi concebido com o objectivo de ser aplicado em RSSF tolerantes a intrusões. Para cumprir com este objectivo, foram identificados dois tipos de ataques: ataques de negação de serviço que inundam a rede de pacotes e ataques ao encaminhamento, originados por introdução de informação falsa de encaminhamento. O protocolo assenta na existência de uma estação base que partilha chaves assimétricas com cada um dos nós da rede. Este mecanismo permite que em caso de um atacante comprometer um nó da rede não terá acesso a mais chaves seguras da rede, permitindo isolar, de alguma forma o ataque.

Funcionamento do protocolo A implementação de redundância no encaminhamento permite que a rede sobreviva a atacantes não detectados. Desta forma, a introdução de múltiplos caminhos independentes entre origem e destino faz com que, ainda que existam atacantes na rede, caso exista pelo menos um destes caminhos sem atacantes as mensagens cheguem ao destino sem estarem comprometidas.

O papel fundamental do protocolo, em termos de encaminhamento seguro, é desempenhado pela estação base. Uma das vantagens apontadas pelos autores é a redução das

computações nos nós da rede(ex: geração de chaves, tabelas de encaminhamento), cuja limitações de energia e processamento são as conhecidas. Assim, a formação das tabelas de encaminhamento estão divididas em três fases: pedido de rotas (*route request*), recolha de dados de encaminhamento e propagação de rotas. A primeira fase, corresponde ao envio por parte da estação base de uma mensagem destinada a todos os nós da rede por forma a obter dados sobre as vizinhanças. Cada nó então, numa segunda fase, responde com a sua vizinhança para estação base. Por fim, esta informação é tratada por forma a elaborar as tabelas de encaminhamento, sendo depois propagadas para cada nó.

2.2.4 *Secure Sensor Network Routing: Clean-Slate approach*

[35]

2.2.5 Discussão

2.3 Modelo de Adversário, Ataques ao Encaminhamento e Contra-medidas

São vários os ataques que se pode direccionar contra a pilha da arquitectura de uma RSSF. Cada uma das camadas da pilha tem vulnerabilidades próprias das funções que desempenha. No escopo deste trabalho o foco é a segurança ao nível dos protocolos de encaminhamento, representada pela camada de rede, daí nesta secção se apresentar com algum detalhe as fases tradicionais de um protocolo de encaminhamento em MANETs[11] e em particular em RSSF. Os protocolo de encaminhamento em redes de sensores, de uma forma geral dividem-se em três fases: descoberta dos caminhos, selecção dos caminhos, manutenção da comunicação pelos caminhos seleccionados. Importa neste momento realçar o facto de que os ataques a um algoritmo de encaminhamento normalmente exploraram as vulnerabilidades de cada uma destas fases de forma específica. Daí, em seguida se proceder à associação dos ataques específicos que se podem desencadear em cada fase e como estes podem ser mitigados aplicando determinados mecanismos de segurança como contra-medidas.

2.3.1 Ataques à organização da rede e descoberta de nós

Apesar desta fase estar presente em todos os protocolos de encaminhamento é mais vinculada em protocolos do tipo *table-driven*[7] uma vez que estes desencadeiam a criação de tabelas de encaminhamento que se deverão manter actualizadas durante a execução da rede. No entanto em protocolos do tipo *on-demand*[7] também se verifica a existência desta fase mas repete-se em cada início de comunicação ou de transmissão.

Falsificação de Informação de Encaminhamento Um ataque do tipo de introdução de informação de encaminhamento falsa, acaba por ter impacto na construção da rede e na descoberta dos nós. Permite criar entradas incorrectas nas tabelas de encaminhamento, podendo também fazer com que estas fiquem lotadas e inválidas. No caso dos protocolos *on-demand*, o impacto é menos efectivo, uma vez que o atacante terá de estar sempre a injectar informação errada a cada início de transmissão, mas ainda assim pode provocar danos na rede.

Rushing Attacks Outro ataque nesta fase é o *rushing attack*[21] que é definido pela exploração por parte do atacante de uma janela de oportunidade para responder a um pedido de caminho para um destino. Esta operação é desencadeada quando um protocolo aceita a primeira resposta que recebe (exemplo do AODV[36]), calculando isto o atacante é sempre um candidato a ser o próximo encaminhador, uma vez que não respeita temporizadores nem condições de resposta.

Route Request (RREQ) Flooding Attacks Por fim, pode-se ainda tipificar ataques encetados por *flooding* de mensagens do tipo route-request (RREQ), usadas para iniciar a descoberta de caminhos. Permite ao atacante explorar as limitações energéticas da rede, levando os nós legítimos a responder continuamente e fazer as operações inerentes à descoberta de um caminho.

2.3.1.1 Contra-medidas

A aplicação de mecanismos de autenticação no protocolo de encaminhamento faz com que ataques de falsificação de informação e inundação de mensagens RREQ seja minimizados. Os nós da rede podem partilhar chaves assimétricas como forma de autenticar as mensagens de dados e controlo de encaminhamento (RREQ e RREP), desta forma o atacante como não possui as chaves necessárias para a comunicação não poderá participar. Para fazer face a ataques

de *rushing* alguns autores [21] apresentam dois mecanismos de defesa: reenvio aleatório de RREQ (*randomized RREQ forwarding*) e detecção segura (*secure detection*). No primeiro mecanismo, cada nó guarda um conjunto de mensagens RREQ escolhendo depois aleatoriamente um para reenviar. Ainda assim, uma mensagem RREQ maliciosa pode ser seleccionada, daí existir o segundo mecanismo, que proporciona a troca de mensagens autenticadas entre dois nós garantindo que as mensagens pertencem a nós legítimos.

2.3.2 Ataques ao estabelecimento de rotas

HELLO Flooding Este ataque foi identificado primeiramente por [25] sendo definido como um ataque que explora alguns protocolos que se fazem anunciar aos seus vizinhos pela emissão de mensagens de *HELLO*, informando-os da sua proximidade e presença. Os protocolos que assentam em localização podem ser vulneráveis a este ataque, uma vez que com um dispositivo do tipo *laptop-class*[25], usando um alcance rádio que cubra toda a rede, pode-se anunciar a todos os nós como vizinho forçando a informação fluir através dele.

Ataque Sinkhole Nas RSSF um dos modos de comunicação é de um-para-muitos(*one-to-many*) e este tipo comunicação, e por consequência qualquer protocolo que use este modo, apresenta alguma vulnerabilidades a ataques do tipo *sinkhole*[32]. Este ataque corresponde a um atacante informar os nós vizinhos de dados errados de encaminhamento anunciando-se como um nó que tem boa comunicação com o nó sink, tornando-se assim um ponto de passagem de informação podendo alterar ou encaminha-la de forma selectiva para outros caminhos.

Ataque Wormhole Neste tipo de ataque, apresentado por Perrig et al [20] a colaboração de dois nós maliciosos (normalmente a muitos hops de distância), quer sejam nós de *laptop-class*[25] ou *sensor-class*[25], contribuem para uma maior efectividade da acção de ataque. Assim, os atacantes estabelecem uma ligação (ou túnel, normalmente de melhor qualidade - maior largura de banda) para comunicarem entre si. Um nó malicioso captura pacotes ou partes de pacotes e envia-os pela ligação privada para o outro atacante para outro extremo da rede. Este ataque é particularmente eficaz em redes ad-hoc e redes baseadas em localização e sendo estas comprometidas, não conseguiram estabelecer caminhos maiores do que dois hops causando interrupções nas comunicações[49]. Este ataque transforma o caminho os atacantes em nós muito solicitados, pois apresentam-se

aos outros nós participantes como tendo melhor ligação e a menos distância do destino.
[10]

Ataque Sybil Este ataque foi definido como um ataque que permitia atingir os mecanismos de redundância em armazenamento distribuído em ambientes de ponto-a-ponto (peer-to-peer)[16]. Outra definição que surge, agora associada às RSSF, é a que o define como “um dispositivo malicioso que ilegitimamente assume múltiplas entidades”[31]. Com estas definições e devido à sua taxonomia é um ataque bastante efectivo contra protocolos de encaminhamento[25]. Em particular dos protocolos que adoptam múltiplos caminhos, observa-se então, que um nó ao assumir várias identidades possibilita que na realidade os dados possam estar a passar por um mesmo nó malicioso.

2.3.2.1 Contra-medidas

Uma das formas de prevenir um ataque HELLO flooding[?] é a implementação de mecanismos de respostas(*aknowledge*) a anúncios HELLO. Desta forma, caso o atacante esteja a usar um meio de comunicação potente, que cubra toda a rede, um nó, em que o atacante se encontre fora do seu alcance, não aceitará a anúncio como válido. Para além deste mecanismo é possível proceder à autenticação da mensagem, certificando-a numa entidade central, que ao detectar que um nó se anuncia como vizinho de muitos outros nós, toma precauções suspeitando que se trata de um atacante podendo repudiar o nó emitindo uma mensagem para toda a rede.

Alguns autores apresentam mecanismos como a utilização de *packet leashes* [19] por forma a mitigar o ataque *wormhole*. Preconizam que existem dois tipos de condições para se aceitar os pacotes vindos de uma origem: baseado na localização e no tempo. Assim, o primeiro permite um nó receptor, conhecendo a localização da origem, saber se um pacote que atravessou a rede por um *wormhole* calculando a distancia entre os dois pontos. No segundo caso, baseia-se essencialmente no tempo de transmissão do pacote, exigindo então a sincronização de relógios, se for muito rápido a chegar ao destino, este nó assume que se está perante um ataque de *wormhole*.

Para o ataque *sybil* em [31], são fornecidos dois esquemas de protecção: *radio resource testing* (cada vizinho só pode transmitir num canal, selecciona uma canal para ouvir, e envia uma mensagem, os nós que não responderem são tratados como falsos) e *random key distribution*.(usando um modelo de *key-pool* são atribuídas n keys de um conjunto de m se dois nós partilharem q key então podem comunicar de forma segura, existe ainda uma função de hash,

com base no ID do nó para gerar chaves, evitando que um nó possa ter multiplas chaves)

2.3.3 Ataques à manutenção de rotas

Ataque *Blackhole* Entende-se por um ataque do tipo *blackhole*[18] um ataque desencadeado por um nó malicioso que intercepta os pacotes dirigidos ao local que pretende atacar e informa a origem como sendo um caminho de melhor qualidade. Assim, força todo o tráfego, dirigido ao destino, alvo do ataque, a circular através dele. Por exemplo protocolo AODV [37] tratando-se de um protocolo on-demand permite que, na fase de descoberta de uma rota, qualquer nó, que possua um caminho (suficiente recente), responda a uma mensagem de RREQ. Com isto, este algoritmo de encaminhamento fica pode ficar sujeito a um ataque de blackhole, pois um nó intermediário, malicioso, pode responder com um caminho melhor apesar de não ter sequer caminho para o destino originando assim um “buraco negro”, desta forma interrompe o processo de comunicação.

2.3.3.1 Contra-medidas

2.3.4 Discussão/Resumo

Como forma de sistematizar a análise os ataques ao encaminhamento e as contramedidas para os mitigar apresenta-se a seguinte tabela resumo.

2.3.5 Aspectos em aberto e necessidade de avaliação experimental

2.4 Ambientes de Simulação

Algumas das limitações existentes nas plataformas das RSSF, devem-se ao facto de se pretender manter os sensores com um preço o mais baixo possível. Apesar de cada sensor por si não representar um investimento avultado quando se escala uma rede de 10 sensores para os milhares de dispositivos este valor pode representar valores bastante elevados. No campo da investigação estão a ser introduzidos novos protocolos de encaminhamento, novas aplicações, novos algoritmos e tecnologias de segurança. Como se trata de redes com tempo de vida limitado, devido ao fornecimento de energia ser limitado, o uso real de sensores apresenta-se como uma forma pouco eficiente para o desenvolvimento de novas tecnologias ou melhoramento das existentes.

Os ambientes de simulação de redes de sensores surgem como uma necessidade inevitável, para o rápido teste e desenvolvimento das redes de sensores e todas as tecnologias associadas, antes destas se implementarem. Alguns dos ambientes existentes foram adaptados de outros já existentes para redes sem fios ou *ad-hoc*, como é o caso do NS2[?] ou J-Sim[.]. As RSSF têm características específicas que diferem das restantes redes, nomeadamente o modelo de comunicação, que tem avançado para a norma 802.15.4[4], bem como a necessidade de monitorizar eficiência energética de cada tecnologia. Outra propriedade importante destes ambientes é a capacidade de rapidamente repetir experiências com determinadas variáveis configuráveis em cada ambiente (ex. nº de nós, modelo de rádio)

O que se pretende nesta secção é a apresentar diversos ambientes de simulação, mais comuns, e que suportem simular sistema de RSSF (em especial TinyOS). Correspondem a critérios de selecção específicos e enumerados seguidamente, com vista à avaliação de um ambiente que se mostre adequado para a utilização no trabalho de dissertação.

2.4.1 Critérios de Selecção

O número de ferramentas de simulação para RSF, tem vindo a aumentar, no entanto pretende-se analisar ferramentas que possuam as seguintes propriedades:

2.4.1.1 Relacionados com Engenharia de Software

Portabilidade da Linguagem Devido às características da linguagem de programação Java[?], inerente ao seu ambiente de execução e à consequente portabilidade para diversas plataformas e a programação orientada a objectos (reutilização) foram seleccionados ambientes apenas desenvolvidos nesta linguagem.

Código Aberto e Livre Esta propriedade permite que se contorne obstáculos inerentes a licenciamento de *software*, bem como possibilita a análise e aproveitamento de todas as funcionalidades existentes, permitindo introduzir algumas melhorias ou alterações específicas.

Modularidade e extensibilidade Tendo em conta que os ambientes não possuem todos as mesmas características e funcionalidades e, considerando que a componente experimental da dissertação irá introduzir novos mecanismos ou funcionalidades, o princípio da modularidade e fácil extensibilidade facilitará o desenrolar do trabalho.

Documentação Sabendo que algumas das plataformas não se encontram muito bem documentadas este critério será importante como ponto de partida para o entendimento de cada uma das arquitecturas das ferramentas.

2.4.1.2 Relacionados com as RSSF

Modelo de Colisões/Comunicação Rádio Este modelo é fundamental que se encontre modelado num sistema de simulação. Por ser um componente base das RSSF e possuir características próprias relacionadas com a simulação da camada de acesso ao meio e ligação de dados que possuem características própria inerentes aos protocolos implementados (B-MAC,S-MAC);

Modelo de Gestão de Energia A energia é uma das características mais importantes a avaliar numa RSSF, uma vez que se trata de um recurso limitado e que impõe limitações no desenho de protocolos de encaminhamento;

Capacidade de Emulação Alguns simuladores possuem uma capacidade extra que lhes permite emular o comportamento de um sensor real tal como ele é especificado. Permitindo fazer o carregamento de código, sem recurso a recompilação, directamente para o *mote*;

Modelo de Mobilidade Ainda que as RSSF sejam maioritariamente instaladas com características estáticas ou de pouca mobilidade, a existência de um modelo de mobilidade possibilita avaliar os comportamentos dos protocolos mediante este factor;

Interface de Visualização Para um melhor controlo da simulação é importante o ambiente de simulação possua uma interface de visualização por forma a perceber os comportamentos dos protocolos.

Modelo de Gestão de Topologia Também um factor de que pode influenciar o comportamento de um protocolo de encaminhamento, é relevante a existência deste modelo como forma de avaliar os protocolos desenhados.

2.4.2 Prowler/JProwler

Esta ferramenta resulta de uma conversão de um simulador de eventos discretos⁶, implementado em MATLAB[?], pela universidade de Vanderbilt[?], para a linguagem Java. Este simulador

⁶Fila global onde são inseridos todos os eventos da rede e que são tratados sequencialmente ou por prioridade, dependendo da implementação

pode ser configurado para simular de forma determinística (permitindo a repetição de experiências) ou probabilística (adequado para simular a forma não determinística de comunicação entre motes). Permite a simulação com diversos nós podendo chegar aos 5000 (ainda que o número possa ser maior, por razões de performance é o valor máximo aconselhado) usando diversas topologias(dinâmicas) nas quais se podem implementar os mais diversos algoritmos.

O JProwler modela os aspectos mais importantes de todos os níveis do modelo de comunicação e de aplicação. A natureza não-determinística da propagação rádio é caracterizada por um modelo de rádio probabilístico usando um modelo simples mas preciso para descrever a operação da camada MAC. Esta ferramenta vem com uma janela de visualização da topologia RSSF. Para o desenvolvimento de aplicações ou protocolos são disponibilizadas classes base que se podem estender. Estão presentes dois modelos de rádio: um de Gauss para topologias estáticas e outro de reighXXX para topologias móveis.

2.4.3 J-Sim

J-Sim (anteriormente conhecido como JavaSim) é um ambiente de simulação baseado em componentes [?], implementado em Java. Não foi desenvolvido inicialmente com vista a sua utilização em RSSF como é o caso do ambiente SENSE[?], mas o objectivo para o desenvolvimento foi o mesmo: extensibilidade. Este ambiente é amplamente usado e implementa um modelo de rede em camadas. No entanto, este simulador não é adequado para o estudo do desempenho em RSSF visto que esta é condicionada pelo *hardware*, pelo sistema operativo, os protocolos de rede e as aplicações assim como optimizações específicas entre camada da pilha de protocolos (ex: implementação de mecanismos de transporte ao nível aplicação). Para além deste problema, J-Sim é um importante ambiente de simulação dada a natureza fracamente acoplada dos seus componentes que permite o rápido desenvolvimento e prototipagem rápida de aplicações.

2.4.4 Freemote

Freemote é uma ferramenta de emulação⁷ leve e distribuída, desenvolvida em Java, utilizada para o desenvolvimento *software* para RSSF. O emulador suporta motes (Squawk, Sentilla Point) e

⁷Técnica onde as propriedades de uma rede existente, desenhada, não ideal são simuladas com o objectivo de desempenho, previsão de impacto de modificações por forma optimizar decisões referentes à tecnologia

plataformas (Java cards, SunSpot) baseados em Java. Devido a arquitectura em três camadas bem definidas por interfaces: Aplicação, Encaminhamento e Ligação de Dados e Física. Sendo um emulador, os nós reais podem ser baseado na norma de comunicação IEEE802.15.4[?] (ex:MICAz, JMotes, Tmote Sky).

Trata-se de um emulador de RSSF, disponível com um interface gráfico para configuração que permite executar o código em motes baseados em Java. Pode ser usado para o desenvolvimento de algoritms para RSSF, uma vez que suporta experiências de grande escala (até cerca de 10.000 nós) incluindo a integração com nós reais baseados em Java e na norma IEEE802.15.4. Os principais pontos negativos são: 1) o modelo de propagação rádio é muito simples uma vez que não considera obstáculos entre os nós. 2) existe um modelo de comunicação realistico limitado a emulação simples e a plataformas especificas (JMote). 3) Não é orientada para a análise de performance, característica pode ser importante no desenvolvimento de algoritmos para RSSF.

2.4.5 ShoX

Trata-se de um simulador de redes sem fios, implementado em Java[?]. A ideia principal desta ferramenta é a de proporcionar, uma forma fácil e intuitiva, a implementação e desenho de protocolos de rede, modelos de mobilidade, modelos de propagação de sinal ou de tráfego de rede. Tal como outros simuladores incorpora um simulador de eventos discretos, que faz a gestão de todos os eventos da rede. Todos os conceitos conhecidos no dominio das redes sem fios são modelados neste simulador (modelo OSI, pacotes,modelos de mobilidade e energia). Uma das vantagens é a existência de classes abstractas para reimplementação de novos modelos de cada um dos componentes facilitando a programação de novos protocolos ou novas funcionalidades. A comunicação entre componentes é feita por intermédio de eventos, ou seja não existe acesso de um componente a outro. Deve-se destacar o interface gráfico, que permite operar todas funcionalidades da ferramenta sem a necessidade de editar directamente os ficheiros de XML. Para além disso é ainda possível visualizar e extrair dados gráficos das simulação e da topologia de rede. O facto do modelo de propagação de sinal ser baseado na norma IEEE802.11, torna dificil a adaptação às condições das RSSF, no entanto a modularidade do sistema permite o desenvolvimento de uma camada IEEE802.15.4 para se aproximar da norma mais recente de comunicação das RSSF.

2.4.6 Discussão

A necessidade de recorrer a ambientes de simulação para desenvolvimento de tecnologias de RSSF é uma realidade difícil de contornar dadas as características das RSSF e a necessidade de estudar todas as suas características. O que se tem vindo a observar é que, apesar da multiplicidade de simuladores existentes[?], todos os ambientes foram criados ou adaptados com características muito ligadas para o fim a que se proponham testar ou avaliar nas RSSF. Analisando algumas destas ferramentas nota-se que não existe uma suficiente genérica e flexível que permita avaliar todos os aspectos de uma RSSF. No caso do Freemote, embora especificamente desenvolvida para as RSSF, não incorpora modelos importantes como é o caso da energia, factor altamente restritivo nestas redes, e que, devido ao impacto que tem em cada componente, merece ser modelado e dado alguma atenção. Ainda neste simulador notem-se as carências ao nível do modelo rádio.

Uma das características dos simuladores estudados, exceptuando o Freemote, é o facto de serem orientados para redes sem fios em geral ou redes *ad-hoc*. Devido às diferenças que existem entre estas redes e as RSSF torna-se difícil a avaliação de protocolos ou aplicações. No entanto é de realçar que o ShoX se apresenta como uma plataforma com bastantes modelos de redes *ad-hoc*, alguns dos quais aplicados a RSSF, nomeadamente o modelo de consumo de energia e o modelo de rádio(ainda que a norma implementada seja IEEE802.11). Quanto à plataforma J-Sim esta tem de ser usada juntamente com um componente de RSSF e requer a implementação dos modelos numa linguagem de *script* que implica: a aprendizagem de uma nova linguagem e o *overhead* de se ligar duas linguagens, que podem penalizar o desempenho da simulação. Por fim, a simplicidade do JProwler pode servir de ponto de partida para a elaboração de um simulador para teste e avaliação de protocolos de encaminhamento seguro, uma vez que tem um comportamento baseado no TinyOS e com modelos do *Mica2* pode ser estendido a incorporar módulos de gestão de energia e de análise gráfica de comportamentos ou eventos que sirvam de indicadores como por exemplo: energia consumida, fiabilidade, tempo de vida da rede e cobertura

2.5 Discussão e Resumo do Trabalho Relacionado

3 . Abordagem à fase de elaboração da dissertação

4 . Plano de Elaboração da Tese

Bibliografia

- [1] BTnodes - a distributed environment for prototyping ad hoc networks. <http://www.btnode.ethz.ch/Documentation/BTnodeRev3HardwareReference>.
- [2] Mica2 Datasheet. <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=174>.
- [3] SunSPOTWorld - documentation. <http://sunspotworld.com/docs/index.html>.
- [4] IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - specific requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2007.
- [5] Kemal Akkaya and Mohamed Younis. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3(3):325–349, May 2005.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, March 2002.
- [7] J.N. Al-Karaki and A.E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *Wireless Communications, IEEE*, 11(6):6–28, 2004.
- [8] Paolo Baronti, Prashant Pillai, Vince W.C. Chook, Stefano Chessa, Alberto Gotta, and Y. Fun Hu. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards. *Computer Communications*, 30(7):1655–1695, May 2007.
- [9] M. Blum, Tian He, Sang Son, and John A Stankovic. IGF: a State-Free robust communication protocol for wireless sensor networks.
- [10] Sun Choi, Doo young Kim, Do hyeon Lee, and Jae il Jung. Wap: Wormhole attack prevention algorithm in mobile ad hoc networks. In *Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing, 2008. SUTC '08. IEEE International Conference on*, pages 343–348, June 2008.
- [11] S Corson and J Macker. Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations, January 1999.

- [12] George F. Coulouris and Jean Dollimore. *Distributed systems: concepts and design*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1988.
- [13] I. Demirkol, C. Ersoy, and F. Alagoz. Mac protocols for wireless sensor networks: a survey. *Communications Magazine, IEEE*, 44(4):115–121, April 2006.
- [14] Jing Deng, Richard Han, and Shivakant Mishra. Insens: Intrusion-tolerant routing for wireless sensor networks. *Comput. Commun.*, 29(2):216–230, 2006.
- [15] D. Dolev and A. Yao. On the security of public key protocols. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 29(2):198–208, 1983.
- [16] John Douceur and Judith S Donath. The Sybil Attack. pages 251—260, 2002.
- [17] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Hawaii International Conference on System Sciences*, 8:8020, 2000.
- [18] Hongmei Deng, Wei Li, and D.P. Agrawal. Routing security in wireless ad hoc networks. *Communications Magazine, IEEE*, 40(10):70–75, 2002.
- [19] Y.-C. Hu, A. Perrig, and D.B. Johnson. Packet leashes: a defense against wormhole attacks in wireless networks. In *INFOCOM 2003. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications. IEEE Societies*, volume 3, pages 1976–1986 vol.3, March-3 April 2003.
- [20] Yih-Chun Hu, A. Perrig, and D.B. Johnson. Wormhole attacks in wireless networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 24(2):370–380, Feb. 2006.
- [21] Yih-Chun Hu, Adrian Perrig, and David B. Johnson. Rushing attacks and defense in wireless ad hoc network routing protocols. In *WiSe '03: Proceedings of the 2nd ACM workshop on Wireless security*, pages 30–40, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [22] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, John Heidemann, and Fabio Silva. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 11(1):2–16, 2003.
- [23] ITU-T. Recommendation X.800: Security Architecture for Open Systems for CCITT Applications, 1991.

- [24] Y.G. Iyer, S. Gandham, and S. Venkatesan. *STCP: a generic transport layer protocol for wireless sensor networks*. IEEE, 2005.
- [25] Chris Karlof and David Wagner. Secure routing in wireless sensor networks: attacks and countermeasures. *Ad Hoc Networks*, 1(2-3):293–315, September 2003.
- [26] Chris Karlof, David Wagner, and Naveen Sastry. TinySec: a link layer security architecture for wireless sensor networks. pages 162–175, Baltimore, MD, USA, 2004. ACM.
- [27] Mark Luk, Adrian Perrig, Ghita Mezzour, and Virgil Gligor. MiniSec: a secure sensor network communication architecture. pages 479–488, Cambridge, Massachusetts, USA, 2007. ACM.
- [28] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and John Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *WSNA '02: Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [29] Aleksandar Milenković, Chris Otto, and Emil Jovanov. Wireless sensor networks for personal health monitoring: Issues and an implementation. *Comput. Commun.*, 29(13-14):2521–2533, 2006.
- [30] A. Mpitziopoulos, D. Gavalas, G. Pantziou, and C. Konstantopoulos. Defending wireless sensor networks from jamming attacks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*, pages 1–5, Sept. 2007.
- [31] J. Newsome, E. Shi, D. Song, and A. Perrig. The sybil attack in sensor networks: analysis & defenses. In *Information Processing in Sensor Networks, 2004. IPSN 2004. Third International Symposium on*, pages 259–268, April 2004.
- [32] E.C.H. Ngai, Jiangchuan Liu, and M.R. Lyu. On the intruder detection for sinkhole attack in wireless sensor networks. In *Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on*, volume 8, pages 3383–3389, June 2006.
- [33] B. Parno, A. Perrig, and V. Gligor. Distributed detection of node replication attacks in sensor networks. In *Security and Privacy, 2005 IEEE Symposium on*, pages 49–63, May 2005.

- [34] B. Parno, A. Perrig, and V. Gligor. Distributed detection of node replication attacks in sensor networks. pages 49–63, 2005.
- [35] Bryan Parno, Mark Luk, Evan Gaustad, and Adrian Perrig. Secure sensor network routing: a clean-slate approach. In *CoNEXT '06: Proceedings of the 2006 ACM CoNEXT conference*, pages 1–13, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [36] C. Perkins, E. Royer, and S. Das. Rfc 3561 ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. Technical report, 2003.
- [37] C.E. Perkins and E.M. Royer. *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. IEEE, 1999.
- [38] Adrian Perrig and Haowen Chan. Security and Privacy in Sensor Networks.
- [39] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *SenSys '04: Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 95–107, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [40] E. Shi and A. Perrig. Designing secure sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 11(6):38–43, Dec. 2004.
- [41] William Stallings. *Cryptography and Network Security (4th Edition)*. 2005.
- [42] Andrew S. Tanenbaum and Maarten Van Steen. *Distributed Systems: Principles and Paradigms*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.
- [43] Hua-Wen Tsai, Chih-Ping Chu, and Tzung-Shi Chen. Mobile object tracking in wireless sensor networks. *Comput. Commun.*, 30(8):1811–1825, 2007.
- [44] B.A. Warneke and K.S.J. Pister. Mems for distributed wireless sensor networks. In *Electronics, Circuits and Systems, 2002. 9th International Conference on*, volume 1, pages 291–294 vol.1, 2002.
- [45] Anthony D. Wood, Lei Fang, John A. Stankovic, and Tian He. SIGF: a family of configurable, secure routing protocols for wireless sensor networks. pages 35–48, Alexandria, Virginia, USA, 2006. ACM.

- [46] Yang Xiao, Hsiao-Hwa Chen, Bo Sun, Ruhai Wang, and Sakshi Sethi. MAC security and security overhead analysis in the IEEE 802.15.4 wireless sensor networks. *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2006(2):81–81, 2006.
- [47] Wei Ye, J. Heidemann, and D. Estrin. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, 12(3):493–506, June 2004.
- [48] Jennifer Yick, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12):2292–2330, August 2008.
- [49] Hu. Yih-Chun and A. Perrig. A survey of secure wireless ad hoc routing. *Security & Privacy, IEEE*, 2(3):28–39, May-June 2004.