



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. Esta autonomia e auto-organização apresenta alguns desafios relacionados com os aspectos de segurança, nomeadamente, no que concerne com o encaminhamento de dados. Assim, 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 ou captura de nós, quer sejam bizantinos ou probabilísticos, 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 seguro. Pretende-se estudar alguns destes algoritmos, representantes do estado da arte neste domínio, estabelecendo uma matriz de medidas de resistência ao modelo de adversário. Os algoritmos alvo deste estudo são o SIGF, Clean-slate e INSENS, entendendo que no seu todo cobrem todas tipologias de ataque em análise, no entanto cada um tem lacunas no seu desenho quando direccionados alguns destes ataques. Ainda como contributo deste trabalho, pretende-se modelar um ambiente de simulação que permita avaliar/analisar, no quadro de ataques definido, as características dos protocolos de encaminhamento em RSSF em matéria de segurança e resistência a ataques. Portanto, importa estudar e estabelecer critérios para análise de sistemas de simulação para RSSF das as características conhecidas, por exemplo os recursos limitados dos modelos de energia, processamento e comunicação.

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

Abstract

The title "Abstract" font times-roman and bold. The text of the abstract with 20 to 30 lines, or 250 to 400 words, font times-roman 12 and 1.5 spacing as a reference.

.... and a blank line and the bar after the last sentence

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

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Introdução geral ou Motivação	1
1.1.1	Caracterização de RSSF	1
1.1.1.1	Componentes	2
1.1.1.2	Aplicações	2
1.2	Descrição e contexto (ou descrição do problema)	3
1.3	Solução apresentada (ou âmbito do trabalho)	4
1.4	Principais contribuições previstas	4
2	Trabalho relacionado	5
2.1	Desenho e Implementação de RSSF Seguras	5
2.1.1	Arquitectura de uma RSSF	5
2.1.1.1	Pilha de Protocolos de uma RSSF	5
2.1.1.2	Modelo da plataforma genérica de uma RSSF - <i>Mote</i>	7
2.1.2	Arquitectura de Serviços de Segurança em RSSF	8
2.1.2.1	Requisitos de segurança de uma RSSF	8
2.1.2.2	Serviços de Segurança	10
2.2	Modelo de Adversário e Serviços de Segurança	11
2.2.1	Modelo de Dolev-Yao	11
2.2.2	Modelo de Intrusão em RSSF	12
2.2.2.1	Modelo bizantino: adversários bizantinos	13
2.2.2.2	Novos modelos de adversário - soluções probabilísticas	13
2.3	Estudo de Protocolos de Encaminhamento Seguro para RSSF	14
2.3.1	Caracterização dos protocolos de encaminhamento em RSSF	14
2.3.2	<i>Secure Implicit Geographic Forwarding (SIGF)</i>	15
2.3.3	<i>INtrusion-tolerant routing protocol for wireless Sensor NetworkS (IN-SENS)</i>	17
2.3.4	<i>Secure Sensor Network Routing: Clean-Slate approach</i>	17
2.3.5	Discussão	17
2.4	Modelo de Adversário, Ataques ao Encaminhamento e Contra-medidas	17
2.4.1	Ataques à organização da rede e descoberta de nós	18

2.4.1.1	Contra-medidas	18
2.4.2	Ataques ao estabelecimento de rotas	19
2.4.2.1	Contra-medidas	20
2.4.3	Ataques à manutenção de rotas	20
2.4.3.1	Contra-medidas	21
2.4.4	Discussão/Resumo	21
2.4.5	Aspectos em aberto e necessidade de avaliação experimental	21
2.5	Ambientes de Simulação	21
2.5.1	Critérios de Selecção	22
2.5.2	Prowler/JProwler	23
2.5.3	J-Sim	23
2.5.4	Freemote	24
2.5.5	ShoX	24
2.5.6	Discussão	25
2.6	Discussão e Resumo do Trabalho Relacionado	26
3	Abordagem à fase de elaboração da dissertação	27
4	Plano de trabalho	29

Lista de Figuras

2.1	Modelo de um Sensor de uma RSSF (baseado em [?])	7
-----	--	---

Lista de Tabelas

1 . Introdução

1.1 Introdução geral ou Motivação

Os recentes avanços no fabrico de *hardware* de pequena dimensão com capacidades para desempenhar tarefas específicas, tendo em conta também na diminuição do tamanho dos dispositivos de comunicação sem fios, fez surgir, nos ultimos anos um novo campo da investigação, as redes de sensores sem fios. Uma rede de sensores é um conjunto de pequenos dispositivos de computação de baixa potência distribuídos num determinado ambiente com a função de recolher sensorialmente (ou monitorizar) fenómenos físicos na ausencia de um observador. Um ambiente pode ser um qualquer espaço onde uma RSSF possa ser instalada por exemplo: uma casa, um terreno de combate ou o próprio corpo humano. Entende-se por fenómeno como sendo uma entidade ou característica que é do interesse do observador.

A componente básica e fundamental de uma rede de sensores é o nó sensor (*mote*) . Este pode conter diversos sensores para monitorizar, por exemplo, temperatura, luz ou movimento consoante as necessidades da aplicação. É caracterizado por ser pequeno, pouco poder de computação, baixa largura de banda de comunicação e energia limitada. Conhecidas estas limitações, os sensores têm de ser distribuídos em grande número como forma de aumentar a redundância.

1.1.1 Caracterização de RSSF

As redes de sensores sem fios são um caso especial de redes móveis *ad-hoc*(*MANET*)[?]. Têm surgido com um papel importante no campo da computação móvel e ubíqua. São constituídas por pequenos dispositivos (que vão das dezenas aos milhares de sensores), que podem ser distribuídos, autonomamente, em determinado local, com vista a desempenharem funções de monitorização de fenómenos físicos, como por exemplo, temperatura, humidade, detecção de presença. Estes dispositivos de baixa potência, também denominados sensores inteligentes(*Smart Sensors*)[?], são constituídos por um ou mais sensores, por processador, por memória, por bateria e por um mecanismo de comunicação por rádio-frequência (norma 802.15.4 [?]).

No entanto, dadas as características de auto-organização/configuração, encaminhamento *multi-hop*, baixo custo, miniaturização e versatilidade de implementação (devido no necessidade de

infraestrutura adicional de comunicação entre nós)[?], o seu uso tem-se estendido a outros campos, nomeadamente os do domínio militar, segurança e medicina.[**FALTA UMA REFERENCIA PARA AS aplicações**] Ao contrário do que acontece com as redes convencionais, as RSSF apresentam limitações de energia, alcance de comunicação, processamento, armazenamento e memória. Assim, todo o processamento e comunicação tem sempre em conta estas condicionantes, já que qualquer tarefa desempenhada penaliza o consumo de energia, com 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.

1.1.1.1 Componentes

As RSSF são constituídas, essencialmente, por pequenos dispositivos que desempenham funções diferentes na rede. O *hardware* implementado de pequena dimensão e com características muito específicas para a tipologia de aplicações às quais se aplica. Os *nodes* (denominados de nós de rede de uma RSSF) diferem uns dos outros consoante a sua função na rede, genericamente poderão desempenhar dois papéis: nó genérico gerador de informação (*source-nodes*) ou nó base ou de sincronização (nó colector de dados da rede ou de execução de comandos de pesquisa)[**REFERENCIA**]. Outro tipo de componente também presente são os nós de interligação ou *gateways* que 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 e teste de protocolos, que possuem ligações a computadores (ligação rede *ethernet*, RS232), podendo ainda funcionar como interligação para *gateways* [**REFERENCIA**]

1.1.1.2 Aplicações

Tendo em conta as características das RSSF, muitas foram as aplicações encontradas para a utilização/exploração desta arquitectura distribuída. O carácter autónomo destas redes oferece um número de vantagens que propicia a sua utilização em locais remotos e sem necessidade de manutenção. Sendo assim, as aplicações poderão ser divididas nas seguintes classes de funções:

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

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

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

1.2 Descrição e contexto (ou descrição do problema)

A segurança nas RSSF é uma problema *de facto*, com impacto na sua aplicação em sistemas críticos. Apesar da evolução do desenvolvimento de *hardware*, dos nós sensores, indicar que se pretende alcançar dispositivos de muito baixo custo, com menos constrangimentos e mais capacidades, a investigação e desenvolvimento necessita de ferramentas que permitam testar novos algoritmos, protocolos, topologias sem que se tenha de instalar uma rede com sensores reais. A aplicação real de sensores, na investigação tem constrangimento de ordem orçamental, que limita a dimensão das redes criadas e que não permite a repetição de experiências, variando apenas algumas condições predefinidas. Para suprir estas limitações surge a necessidade de criar 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. 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 Solução apresentada (ou âmbito do trabalho)

Assim, o desafio que se coloca é o desenho de um modelo de avaliação de protocolos de encaminhamento seguro em RSSF, que possibilite o desenho e implementação destes protocolos com vista proporcionar mecanismos que visem avaliar estes modelos. Por se tratar de questões de segurança, poder-se-á ainda proporcionar o estudo do impacto dos ataques enformados pelo modelo de adversário apresentado neste trabalho em cada um dos protocolos facilitando assim a avaliação possível adequação dos protocolos implementados.

1.4 Principais contribuições previstas

As principais contribuições previstas devem poder ser descritas em não mais do que uma página, podendo adoptar-se, por exemplo, um estilo de apresentação por itens, com uma pequena descrição de um parágrafo associado a cada item.

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 Pilha de Protocolos de uma RSSF

Uma arquitectura para a pilha de protocolos em RSSF foi proposta por [?], 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. [?].

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[?].

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[?]. 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[?][?].

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 [?] 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.

2.1.1.2 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 fazer-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.

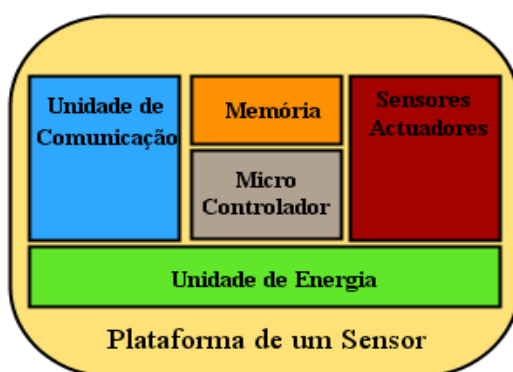


Figura 2.1 Modelo de um Sensor de uma RSSF (baseado em [?])

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. Assim, importa perceber com mais algum detalhe alguns destes sistemas e não menos importante algumas características de sistemas operativos para estas plataformas existentes na actualidade bem como conhecer genericamente algumas implementações usadas no desenho de RSSF.

2.1.2 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.

2.1.2.1 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 apartir 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 mensagens 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).

2.1.2.2 Serviços de Segurança

TinySec[?] 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 com o recursotambém ao CBC-MAC). Para se adaptar às RSSF o MAC tem um comprimento de 4 bytes ao contrário dos 8 ou 16 habituais. Uma vez que neste mecanismo as propriedades de segurança estão determinadas pelo comprimento do MAC os autores afirmam que para uma RSSF é suficiente uma vez que um atacante teria de efectuar 2^{31} tentativas, que demorariam cerca de 20 meses a realizar com um canal de 19.5Kbs. Note-se que a frescura das mensagens não foi endereçado nesta arquitectura uma vez que os autores consideram como demasiado exigente em termos de recursos o que contrariaria o objectivo inicial da arquitectura.

MiniSec[?] 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

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

²Secure Network Encryption Protocol

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 critografia simétrica, autenticando as mensagens com um MAC,

Sistemas de distribuição de chaves[?] Confidencialidade e autenticação são aspectos críticos das redes de sensores com o objectivo de prevenir que um adversário comprometa a segurança de um sistema. Devido à natureza *ad-hoc* das redes, a comunicação intermitente e os recursos limitados, os mecanismos de gestão de chaves e autenticação de grupo tornam-se difícil de alcançar. Alguns esquemas para distribuição e gestão de chaves tem vindo a ser desenvolvidos pela investigação com vista a compreender as especificidades das RSSF.

ZigBee[?]

2.2 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.

2.2.1 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 [?]. 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

³Counter Mode

assumpção, entende-se portanto, que o adversário transporta a mensagem e com isso adota 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 [?] 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.

2.2.2 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[?]. 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[?] até ao nível de intrusão física em que um actor externo, tendo acesso a um ou más sensores legítimos, descobre os segredos criptográficos permitindo-lhe replicar[?] os segredos para sensores maliciosos, que depois de introduzidos podem agir de forma coordenada comprometendo a rede. Conseguída 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.

2.2.2.1 Modelo bizantino: adversários bizantinos

2.2.2.2 Novos modelos de adversário - soluções probabilísticas

As redes de sensores apresentam-se como um

2.2.2.3 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 mitiga-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 per 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 [?] e os atacantes como internos e externos[?]. Nestes ultimos ainda se pode classificar quanto aos recursos usados como *sensor-class* ou *laptop-class*[?]. Os ataques que se consideram para o estudo e relacionados com as RSSF são: falsa informação de encaminhamento, *blackhole*, *sinkhole*, *wormhole* e *sybil attack*[?].

2.3 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*.

2.3.1 Caracterização dos protocolos de encaminhamento em RSSF

Podem-se estabelecer três classes de protocolos[?]: 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[?]). Por fim, os protocolos hierárquicos, cuja concepção é baseada na construção de grupos de nós, normalmente definidos como *clusters*(ex: LEACH[?]), que funcionam no principio de agregação de dados do grupo e transferência para nós base.

Para além destas classificações podemos ainda considerar algoritmos quanto ao momento em que estes computam a informação relativa ao caminho entre a origem e o destino [?]. 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[?], 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.

2.3.2 *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 classifica-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 MAC⁴ 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 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[?] não pretende manter um bom desempenho e uma elevada taxa de sucessos 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 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*[?] por não emitir logo para o primeiro CTS mas sim manter um conjunto de possíveis candidatos para o próximo nó. A

⁴Medium Access Control

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 ultimo 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

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

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

2.3.5 Discussão

2.4 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[?] 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 especifica. 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.

2.4.1 Ataques à organização da rede e descoberta de nós

Apesar desta fase estar presente em todos os protocolos de encaminhamento é mais vincada em protocolos do tipo *table-driven*[?] 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*[?] 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*[?] 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[?]), 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.

2.4.1.1 Contra-medidas

No que se refere à informação falsa de encaminhamento a autenticação é o meio mais usado, uma vez que desta forma se poderá certificar se a informação tem uma fonte legítima.

2.4.2 Ataques ao estabelecimento de rotas

HELLO Flooding Este ataque foi identificado primeiramente por [?] 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* [?], 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* [?]. 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 [?] a colaboração de dois nós maliciosos (normalmente a muitos hops de distância), quer sejam nós de *laptop-class* [?] ou *sensor-class* [?], 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 [?]. 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. [?] Alguns autores apresentam mecanismos como o utilização de *packet leases* [?] como forma de mitigar este ataque, de forma breve, preconizam que existe 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.

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)[?]. Outra definição que surge, agora associada às RSSF, é a que o define como “um dispositivo malicioso que ilegitimamente assume múltiplas entidades”[?]. Com estas definições e devido à sua taxonomia é um ataque bastante efectivo contra protocolos de encaminhamento[?]. 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.

2.4.2.1 Contra-medidas

Para mitigar ataques de HELLO flooding[?] pode-se simplesmente implementar um mecanismo de resposta (*aknowledge*) aos pacotes de HELLO. Assim, caso esteja a decorrer um ataque usando um potência de comunicação abrangente de toda a rede, a resposta não será possível porque os nós mais distanciados não possuíram capacidade de alcançar o atacante, anulando por isso o anuncio de vizinhança. Outra forma é a que cada mensagem de HELLO obriga a autenticação da origem numa entidade central que ao detectar que um nó se está a autenticar com esta mensagem em vários nós então devem ser tomadas medidas para precaver um ataque desta natureza.

2.4.3 Ataques à manutenção de rotas

Ataque Blackhole Entende-se por um ataque do tipo blackhole [Hongmei Deng; Wei Li; Agrawal, D.P., “Routing security in wireless ad hoc networks,” Communications Magazine, IEEE, vol.40, no.10, pp. 70-75, Oct 2002] 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 [AODV REF] 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.

Ataque *Spam*

2.4.3.1 Contra-medidas

2.4.4 Discussão/Resumo

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

2.4.5 Aspectos em aberto e necessidade de avaliação experimental

2.5 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[?], 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.

2.5.1 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:

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 seleccionadas ferramentas apenas desenvolvidas nesta linguagem, ainda que algumas possam apresentar linguagem complementares para modelação de aplicações (JSim com o JTcl).

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 utilização na componente experimental da dissertação poderá 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. No caso do JProwler, a simplicidade e a documentação do código é suficiente para ser considerado como adequado tendo em conta este critério.

2.5.2 Prowler/JProwler

Esta ferramenta resulta de uma conversão de um simulador de eventos discretos⁵, implementado em MATLAB[?], pela universidade de Vanderbilt[?], para a linguagem Java. Este simulador 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.

2.5.3 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.

⁵Fila global onde são inseridos todos os eventos da rede e que são tratados sequencialmente ou por prioridade, dependendo da implementação

2.5.4 Freemote

Freemote é uma ferramenta de emulação⁶ leve e distribuída, desenvolvida em Java, utilizada para o desenvolvimento *software* para RSSF. O emulador suporta motes (Squawk, Sentilla Point) e plataformas (Java cards, SunSpot) baseados em Java. Devida 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.

2.5.5 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

⁶Técnica onde as propriedades de uma rede existente, desenhada, não ideal são simuladas com o objectivo de desempenho, previsão de impacte de modificações por forma optimizar decisões referentes à tecnologia

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 difícil 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.

2.5.6 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 devida 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.

2.6 Discussão e Resumo do Trabalho Relacionado

3 . Abordagem à fase de elaboração da dissertação

4 . Plano de Elaboração da Tese

