

IDEA: Um Protocolo para o Isolamento e Desvio de Anomalias em Redes de Sensores

Hermano P. Brandão¹, Artur Ziviani², Paulo André da S. Gonçalves¹

¹Centro de Informática (CIn)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
50.740-540 – Recife, PE – Brasil

²Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC)
Av. Getúlio Vargas, 333 – 25651-075 – Petrópolis, RJ – Brasil

{hpb,pasg}@cin.ufpe.br, ziviani@lncc.br

Abstract. *We propose the IDEA (Isolation and DEtour Anomalies) protocol for sensor networks, which is able to isolate and detour from an anomaly region. To build these detours, an equation in the Cartesian plane is used to determine multipath. Unlike previous works, the IDEA is flexible, meaning that it allows the adoption of many equations types and, therefore, different ways to detour of an anomaly region. Results show the efficiency of IDEA in establishing detours around anomaly regions with load balancing due to the use of multiple paths.*

Resumo. *Este artigo propõe o IDEA (Isolamento e DEsvio de Anomalias), um protocolo para redes de sensores capaz de isolar uma região de anomalia e construir desvios em torno da mesma. Para a construção desses desvios, são utilizados múltiplos caminhos baseados em curvas de equações no plano cartesiano. Diferentemente de outras propostas, o IDEA possui uma modelagem flexível que possibilita a utilização de diferentes tipos de equações e, conseqüentemente, diferentes formas de se desviar de uma região de anomalia. Os resultados demonstram o bom desempenho do IDEA em realizar desvios de regiões de anomalias com um balanceamento de carga decorrente da utilização de múltiplos caminhos.*

1. Introdução

Em redes de sensores, a ação de nós maliciosos na rede pode adulterar o conteúdo das mensagens e interferir na forma como as mesmas são roteadas. Em qualquer um dos casos, o nó interessado nos dados, conhecido como *sink*, pode receber informações erradas ou incompletas dos nós fontes (sensores). Nestas situações, é possível dizer que há uma *anomalia* na rede. Os nós responsáveis por provocar anomalias são denominados *nós anômalos*, ou seja, nós com comportamento distinto do esperado. De uma forma mais geral, é possível afirmar que uma anomalia ocorre em uma rede de sensores quando um ou mais nós apresentam uma falha ou promovem um ataque direto à rede. Na maioria dos casos em que uma anomalia ocorre, é necessário neutralizar a ação dos nós relacionados com a origem da anomalia. A forma mais intuitiva de se fazer isso é através da remoção física dos nós anômalos. Entretanto, esses nós nem sempre estão acessíveis e a demora em removê-los pode trazer conseqüências indesejáveis.

Dentro do contexto explicitado, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protocolo capaz de impedir de forma eficaz o encaminhamento ou captura de

mensagens pelos nós anômalos, isolando-os da rede. Contudo, em alguns casos, é necessário identificar não somente os nós anômalos, mas também a região afetada por estes, como por exemplo, a região formada por vizinhos de um nó malicioso que fora introduzido para capturar de forma promíscua pacotes provenientes de sua vizinhança com a intenção de alterar o conteúdo deles antes de encaminhá-los.

Neste artigo, a região afetada pelos nós anômalos será chamada de *região de anomalia*. Essa, por sua vez, pode ser decomposta em duas partes: o núcleo da anomalia e a faixa de isolamento, conforme ilustra a Figura 1. O *núcleo da anomalia* é a menor circunferência que compreende todos os sensores anômalos. Nessa região também pode haver nós legítimos, ou seja, aqueles que não são anômalos. Já a *faixa de isolamento* é a menor coroa circular na qual não há nós anômalos, mas inclui todos os sensores cujas transmissões podem ser capturadas por sensores que estão no núcleo da anomalia.

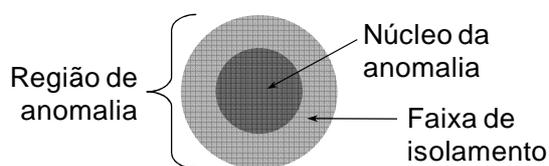


Figura 1 - Detalhamento de uma região de anomalia

Ao se promover o isolamento de uma anomalia, uma parte da rede ficará inacessível. Este fato motivou o desenvolvimento de um protocolo capaz de construir, de forma eficiente, desvios em torno da região de anomalia. Porém, a utilização de um único caminho para desviar as mensagens de dados pode provocar um consumo excessivo dos recursos dos sensores. Conseqüentemente, é necessário também que o protocolo seja capaz de construir múltiplos desvios em torno da região de anomalia a fim de promover um balanceamento de carga.

Em suma, este artigo propõe um protocolo para redes de sensores capaz de isolar as regiões de anomalias e construir múltiplos desvios em torno das mesmas: o IDEA (*Isolamento e DEsvio de Anomalias*). Diferentemente de outras propostas anteriores, o IDEA possui uma modelagem flexível que possibilita a utilização de diferentes tipos de equações e, conseqüentemente, diferentes formas de se desviar de uma região de anomalia. Resultados de simulação mostram um bom desempenho do IDEA em realizar desvios de regiões de anomalias com um balanceamento de carga decorrente da utilização de múltiplos caminhos.

O restante deste artigo está organizado como segue: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 detalha o protocolo IDEA, explicitando como o isolamento das anomalias é realizado e como os desvios são construídos. A Seção 4 avalia a eficiência do IDEA. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

A construção de desvios em redes de sensores é um tópico importante que vem sendo abordado em diversas pesquisas [Fang et al. 2006] [Jia et al. 2007] [Karp e Kung 2000] [Yu et al. 2008] [Tian et al. 2008]. Entretanto, esses trabalhos não utilizam o conceito de anomalia. Ao contrário disso, o objetivo típico é a construção de desvios ao redor de “buracos” na rede, ou seja, ao redor de regiões nas quais não há dispositivos aptos a encaminhar mensagens.

Dentre os trabalhos citados, o que mais se assemelha ao IDEA é o *Energy-Efficient Data Dissemination Protocol* (EEDDP) [Tian et al. 2008]. O EEDDP é uma melhoria do seu predecessor, o *Hole Detour Scheme* [Yu et al. 2008], e foi proposto para balancear o consumo de energia na rede tornando a rota de desvio dinâmica. O primeiro passo desse protocolo é determinar uma elipse que circunscreva o buraco para então repassar os dados dessa elipse a todos os nós que estão dentro da mesma.

Toda vez que uma mensagem é recebida por um nó (U) que possui as informações sobre a elipse, ele irá determinar um ponto âncora básico. Em seguida, a partir da função Gaussiana bidimensional, esse ponto é dinamicamente movido para uma nova localização (V). Essa função produz uma superfície de círculos concêntricos com uma distribuição Gaussiana a partir do centro. Por fim, a mensagem será desviada para V antes de ser encaminhada novamente em direção ao destino (D). Se não houver nó sobre o ponto V , o protocolo escolherá o que estiver geograficamente mais próximo.

O EEDDP é a proposta que mais se aproxima do IDEA porque ele é o único dos trabalhos relacionados que visa a construção de múltiplos caminhos e a realização de um balanceamento de carga entre os mesmos. Entretanto, a forma como esses desvios são construídos ainda é muito rígida. Ao se deslocar as mensagens do ponto U para o ponto V , o único tipo de trajetória seguida é o de uma linha reta. Assim, mesmo variando-se a dinamicamente a posição de V , as mensagens não podem ser bem distribuídas entre os nós da rede.

3. O IDEA

Esta seção detalhada as ações promovidas pelo IDEA quando uma região de anomalia é detectada. Assume-se, portanto, que existe uma solução eficiente para detecção de uma região de anomalia. O IDEA atua junto ao protocolo de roteamento e dedica-se ao isolamento eficiente da região de anomalia previamente detectada.

3.1. Pré-condições

A abordagem adotada para contornar uma região de anomalia possui algumas premissas, as quais são, em sua maioria, atendidas pelos já consolidados paradigmas do roteamento geográfico. Uma delas é considerar que os sensores sejam capazes de determinar as suas próprias localizações [Niculescu 2004]. Além disso, também é possível assumir que cada sensor será capaz de avaliar a sua quantidade de energia remanescente. Adicionalmente, cada nó deverá ser capaz de obter e manter atualizada a localização e a energia remanescente dos seus vizinhos diretos. Contudo, nenhuma informação adicional sobre o estado da rede será conhecida.

Também será assumido que para um nó de origem encontrar e manter uma rota para um nó de destino, ele deverá enviar periodicamente uma mensagem do tipo *request* endereçada para a coordenada geográfica do destino. Esse tipo de mecanismo pode ser observado em protocolos de roteamento como no GPSR [Karp e Kung 2000] e o Directed Diffusion (DD) [Intanagonwiwat et al. 2002].

Por fim, será assumido que as anomalias serão devidamente detectadas por alguma técnica existente [Ssu et al. 2006] [Krishnamachari e Iyengar 2004] [Strikos 2007]. Além disso, os nós responsáveis por essa detecção deverão ser capazes de calcular as dimensões da região de anomalia e associá-la ao menor círculo capaz de circunscrevê-

la. Essas informações serão repassadas aos nós que estiverem a um salto de distância desse círculo. A esses nós é dado o nome de *bastiões*.

3.2. Visão Geral

A primeira ação realizada pelo IDEA quando uma anomalia é detectada é promover o *isolamento* da mesma. Em seguida, se um *sink* envia uma mensagem de *request* para estabelecer ou atualizar uma rota até uma fonte e, nesse processo, essa mensagem é encaminhada para um bastião, esse irá determinar se a mesma deve ser descartada, encaminhada ou se um desvio deve ser iniciado. Se a tendência for encaminhá-la através da região de anomalia, o bastião irá iniciar a construção de um desvio.

O procedimento seguinte realizado pelo bastião é determinar uma trajetória que será usada apenas como referência para a construção do desvio. A essa trajetória é dado o nome de *Trajétoria de Referência* e pode ser vista como um caminho virtual através do qual o *request* deveria ser encaminhado idealmente para se contornar a região de anomalia. A Figura 2 ilustra duas dessas trajetórias representadas pelas linhas tracejadas. O passo seguinte é a escolha do próximo salto. Para isto, o IDEA considera a proximidade dos vizinhos em relação à trajetória de referência, a energia remanescente dos mesmos e o ganho angular de cada um. O ganho angular é o ângulo percorrido a partir do ponto inicial do desvio até o ponto final (maiores detalhes virão na Seção 3.6).

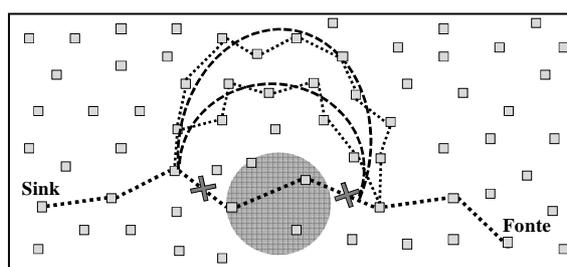


Figura 2 - Visão geral do IDEA

Porém, para que os nós escolhidos como próximo salto possam eleger o salto seguinte, é necessário encaminhar as informações do desvio de um para o outro. Após sucessivos encaminhamentos, o *request* chegará ao fim do desvio. A partir de então, o IDEA deixa de atuar e o protocolo de roteamento da rede volta a encaminhar a mensagem diretamente para o destino. A seguir, todas as ações do IDEA são detalhadas.

3.3. Isolando Anomalias

A fim de impedir que mensagens provenientes de um ataque ou de uma falha comprometam o funcionamento, é necessário impedir a troca de mensagens entre os nós internos e externos à região de anomalia. Porém, para manter os bastiões atualizados sobre a existência da região de anomalia, é necessário permitir que os mesmos recebam *beacons* vindos da faixa de isolamento com informações sobre as coordenadas da região de anomalia e o *status* da mesma (ativa ou inativa). Com este intuito, o IDEA realiza uma filtragem seletiva de mensagens com base em dois filtros: um para o recebimento das mensagens (*Filtro de Entrada*) e outro para o envio das mesmas (*Filtro de Saída*).

O *Filtro de Entrada* possui um algoritmo que atua de forma a impedir que uma mensagem vinda da região de anomalia seja propagada pela rede. Esse algoritmo pode ser subdividido em três partes, dentre as quais, apenas uma será executada. A definição

de qual dessas partes será executada dependerá do posicionamento do nó em relação à região de anomalia, como descrito a seguir:

1. Se o nó estiver no núcleo da anomalia
 - 1.1. A mensagem é descartada
2. Se o nó estiver na faixa de isolamento
 - 2.1. Se o remetente da mensagem recebida também estiver na região de anomalia, essa será descartada;
 - 2.2. Se a mensagem vier de fora da região de anomalia e for um *beacon* requisitando informações sobre o posicionamento e a energia restante, essa mensagem é recebida e tratada. Entretanto, se ela não for um *beacon*, mesmo que de fora da região de anomalia, ela será descartada.
3. Se o nó estiver fora da região de anomalia
 - 3.1. Se a mensagem vier de um nó que está na região de anomalia e for um *beacon* de resposta, essa mensagem é recebida e tratada. Qualquer outro tipo de mensagem vinda da região de anomalia será descartada;
 - 3.2. Todas as mensagens vindas de fora da região de anomalia serão recebidas e tratadas.

O *Filtro de Saída* também possui um algoritmo que pode ser subdividido em três partes. Da mesma forma que no *Filtro de Entrada*, apenas uma dessas será executada dependendo do posicionamento do nó em relação à região de anomalia:

1. Se o nó estiver no núcleo da anomalia
 - 1.1. A mensagem é descartada
2. Se o nó estiver na faixa de isolamento
 - 2.1. Se o próximo salto estiver na região de anomalia, a mensagem é descartada;
 - 2.2. Se o próximo salto estiver fora da região de anomalia e a mensagem for um *beacon* de resposta, ela é enviada.
3. Se o nó estiver fora da região de anomalia
 - 3.1. Se o próximo salto estiver na região de anomalia e a mensagem for um *beacon* de requisição, ela é enviada. Qualquer outro tipo de mensagem em direção à região de anomalia será descartada;
 - 3.2. Se o próximo salto estiver fora da região de anomalia, mensagens de qualquer tipo são enviadas.

3.4. Iniciando a construção de um desvio

Quando uma mensagem de *request* é recebida por um bastião, este executará primeiramente o algoritmo definido pelo protocolo de roteamento para a eleição do próximo salto. Após essa etapa, esse bastião verifica se o nó eleito está dentro da região de anomalia. Caso essa hipótese se confirme, ele iniciará a construção do desvio.

Em seguida, é necessário definir o ponto inicial e final desse desvio. O *Ponto Inicial (PIN)* coincide com a localização do bastião que iniciará a construção do desvio. Já o ponto final estará sobre a reta (r) determinada pelo PIN e a fonte (Figura 3). Uma vez que não é possível prever se haverá algum nó posicionado exatamente sobre a reta r , esse ponto será chamado de *Ponto Ideal Final (PIF)*. Para determinar a localização

exata do PIF, o bastião verifica primeiramente se a reta r intercepta a região de anomalia. Se esse for o caso (Figura 3), o próximo passo é encontrar a projeção ortogonal P do centro dessa região sobre a reta r . Em seguida, é calculada a distância m do ponto P para o PIN. Por fim, o PIF será determinado pelo ponto da reta r que está mais próximo da fonte e também está a uma distância m do ponto P . Dessa forma, o ponto P será o ponto médio entre o PIN e o PIF.

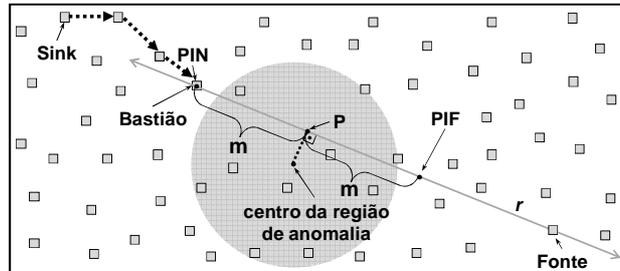


Figura 3 - Determinação do PIN e do PIF

Se a reta r não interceptar a região de anomalia, o algoritmo definido pelo protocolo de roteamento para a eleição do próximo salto será novamente executado. Contudo, nessa nova eleição, o nó anteriormente eleito não será considerado. Esse procedimento se repetirá até que um dos vizinhos que não esteja na região de anomalia seja eleito. Quando isso acontece, a mensagem de *request* é encaminhada para esse nó e a construção do desvio é abortada. Se todos os vizinhos estiverem na região de anomalia, a mensagem de *request* será descartada.

3.5. Definição das Trajetórias de Referência

A definição da trajetória de referência também é de responsabilidade do bastião que iniciar o desvio. Porém, os demais nós da rede não saberão, a princípio, nada sobre essa trajetória. Dessa forma, à medida que os nós forem eleitos, os mesmos deverão receber dados suficientes para poder dar continuidade ao desvio. Por isso, é necessário que a trajetória de referência possa ser determinada através de poucos elementos.

A solução encontrada foi associar um plano cartesiano à superfície em que os nós da rede estão distribuídos e utilizar uma equação matemática para determinar as trajetórias de referência, denominada de *equação de desvio*. Se todos os nós da rede forem configurados previamente para considerarem um mesmo tipo de equação de desvio (por exemplo, $y = ax^2 + bx + c$), é possível determinar uma trajetória de referência conhecendo-se, apenas, os coeficientes da equação (a , b e c) e as coordenadas do PIN e do PIF. Esses valores são denominados *Determinantes da Trajetória*.

Para se definir o posicionamento do plano cartesiano (G) na superfície em que os nós da rede estão distribuídos, é feita a associação do eixo das abscissas com a reta r e do centro do plano G com o ponto P (assumindo a reta r e o ponto P especificados na Seção 3.4). Em seguida, é preciso encontrar um *conjunto de coeficientes válidos*, ou seja, um conjunto de valores que possam ser atribuídos aos coeficientes da equação de forma a determinar uma curva no plano G que contenha o PIN, contenha o PIF e não intercepte a região de anomalia, como ilustra a Figura 4 (o processo de escolha do próximo salto será o foco da Seção 3.6). Uma das vantagens dessa abordagem é que, dependendo do tipo de equação, a determinação dos múltiplos caminhos de desvios pode ser feita simplesmente adotando-se diferentes conjuntos de coeficientes válidos.

A forma como é escolhido um conjunto de coeficientes válidos está diretamente relacionada ao tipo de equação de desvio. Isso quer dizer que vários métodos podem ser criados a fim de se realizar a escolha de um conjunto de coeficientes válidos. Já o tipo de equação de desvio adotado pode ser definido levando-se em conta, por exemplo, a distribuição dos nós, a quantidade de caminhos alternativos desejados, a densidade da rede, o tamanho máximo que a trajetória de referência deve ter, entre outros.

3.6. Escolha do próximo salto

O algoritmo executado em um nó para eleger o próximo salto leva em consideração as seguintes variáveis de cada um dos seus vizinhos:

- **O ganho angular (α):** dado pelo menor ângulo formado pelo PIN, pelo ponto P (definido na Seção 3.4) e pela posição de um vizinho. Esse ângulo representa quantos radianos serão percorridos a partir do PIN, e na direção do PIF, caso o vizinho V seja escolhido como o próximo salto. Uma vez que o PIN e o PIF estão sobre uma mesma reta, o ganho angular só pode assumir valores entre zero e π . A Figura 4 ilustra o ganho angular para dois vizinhos do nó N : V_1 e V_2 .

- **A distância para a trajetória de referência (D):** é a distância geométrica de um vizinho para a projeção ortogonal do mesmo sobre a trajetória de referência. A Figura 4 ilustra as distâncias D_1 e D_2 para a trajetória de referência, respectivamente dos nós V_1 e V_2 . Dependendo da distribuição dos nós na rede, pode haver casos em todos os vizinhos disponíveis estejam muito distantes da trajetória de referência. A fim de impedir um distanciamento excessivo, o IDEA define que o *Limite de Afastamento (LA)* para a trajetória de referência é igual ao dobro do alcance de transmissão de um sensor.

- **A energia remanescente (E):** representa a quantidade de energia, em Joules, que resta no reservatório de um vizinho. O IDEA assume que todos os sensores da rede possuem a mesma *Capacidade Máxima de Energia (CME)*.

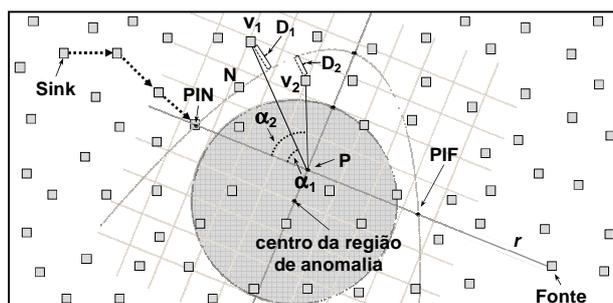


Figura 4 - Determinação do ganho angular (α_1 e α_2) e da distância para a trajetória (D_1 e D_2)

Dessa forma, ao se considerar um nó S e os seus n vizinhos V_n , onde $n = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, o algoritmo do IDEA para a eleição do próximo salto será executado. Esse algoritmo inicia com a escolha aleatória de um vizinho V_n . Se esse for um nó fonte, ele é automaticamente eleito como próximo salto. Caso contrário, será verificado se V_n foi o último salto ou está dentro da região de anomalia. Se alguma dessas duas hipóteses se confirmar, esse vizinho é descartado. Caso contrário, serão obtidos os valores de α_n , D_n e E_n referentes ao vizinho V_n . Se D_n for maior do que o LA, esse nó será descartado.

O passo seguinte do algoritmo é calcular o custo C_n para que o vizinho V_n seja eleito como próximo salto. Uma vez que esse cálculo utiliza os valores de α_n , D_n e E_n , os quais são de naturezas distintas, é necessário primeiramente normalizá-los. Para isso, α_n é dividida por π , D_n pelo LA e E_n pela CME. Assim, os valores obtidos após essa normalização passam a ser representados pelos símbolos α'_n , D'_n e E'_n . Porém, antes de se calcular o custo C_n , é preciso inverter os valores de α'_n e E'_n , pois, quanto maior o ganho angular e a maior quantidade de energia remanescente, menor deverá ser o custo. Finalmente, o valor de C_n pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$C_n = P_1 D'_n + P_2 \frac{1}{\alpha'_n} + P_3 \frac{1}{E'_n}, \quad (1)$$

onde P_1 , P_2 e $P_3 \in [0,1]$ e $P_1 + P_2 + P_3 = 1$. Esses coeficientes representam os pesos que cada um dos respectivos elementos terá ao se calcular o custo de um vizinho. Os valores de P_1 , P_2 e P_3 podem ser ajustados para se realizar de forma mais eficiente a construção dos desvios.

Todo esse procedimento é realizado para cada um dos n vizinhos de S . No final, o vizinho que possuir o custo mínimo (C_{min}) será eleito como próximo salto. Se nenhum dos n vizinhos for elegível para próximo salto, o desvio será abortado. A inegibilidade dos n vizinhos pode ocorrer se, por exemplo, todos eles estão na região de anomalia ou além do LA, ou ainda, se $n = 1$ e esse é o salto anterior.

3.7. Encaminhamento de informações do desvio para o próximo salto

À medida que os nós da rede são eleitos para participar da construção de um desvio, algumas informações, conforme descritas a seguir, precisam ser repassadas entre eles. Essas informações são transmitidas através de uma *Mensagem de Requisição de Desvio (REQD)*, criada pelo bastião responsável por iniciar o desvio.

A primeira etapa para a criação de um REQD é o encapsulamento da mensagem de *request* original. Em seguida, as seguintes informações são adicionadas ao REQD: as coordenadas do PIN, as coordenadas do PIF, os determinantes da trajetória de referência e as dimensões da região de anomalia. O encapsulamento do *request* original permite que o mesmo seja extraído no salto seguinte e disponibilizado para que o protocolo de roteamento possa realizar a criação ou atualização de rotas.

3.8. Finalização de um desvio

A construção de um desvio pode ser finalizada de forma *normal* ou *prematura*. A *Finalização Normal* de um desvio acontece quando um nó percebe que a sua distância para o PIF (D_1) é menor do que a sua distância para o próximo salto (D_2). Quando isso ocorre, a mensagem de *request* é desencapsulada da REQD e ela volta a ser encaminhada para a fonte de acordo com as regras do protocolo de roteamento da rede. Já a *Finalização Prematura* de um desvio pode ocorrer nos seguintes casos:

- *Uma mesma REQD é recebida novamente por um nó* - Nesse caso, a mensagem é simplesmente descartada e o desvio abortado para evitar *loops* de roteamento. Essa abordagem é utilizada inclusive em alguns protocolos, como o DD.
- *A REQD ultrapassa o Limite de Afastamento (LA)* - Isso pode acontecer quando em eleições sucessivas para a escolha do próximo salto só há um vizinho disponível e, em cada uma dessas eleições, o vizinho disponível está cada vez mais

afastado da trajetória de referência. Ou pode ocorrer ainda quando a Equação (1) é mal balanceada. Entretanto, se uma REQD ultrapassa o LA, ela não é descartada. Ao invés disso, a mensagem de *request* original é desencapsulada e a mesma passa a ser encaminhada pelo protocolo de roteamento da rede na tentativa de se alcançar a fonte.

4. Avaliação de Desempenho

A fim de se avaliar o desempenho do IDEA, foi realizada a implementação do mesmo na versão 2.32 do simulador ns-2. Além disso, nesse mesmo simulador, foram feitas modificações nas implementações do DD e do *GEAR* para exercerem a função de protocolo de roteamento da rede. A escolha desses protocolos foi motivada pelo fato de que os mesmos fornecem os pré-requisitos necessários para o funcionamento do IDEA e possuem uma versão já implementada e validada no ns-2.

4.1. Modelo para Determinação das Trajetórias de Referência

Uma vez que o IDEA permite que se leve em consideração as características da rede para se determinar a equação de desvio, o método para a escolha dos seus coeficientes e os pesos α , β e γ da Equação (1), foi necessário defini-los para a avaliação de desempenho. Para definir o tipo de equação de desvio foi realizado um estudo comparativo entre os gráficos de algumas equações [Brandão, 2009]. Neste estudo avaliou-se inicialmente curvas das seguintes equações:

$y = ax^2 + bx + c$, $y = a \cdot x^b$, $y = a \cdot e^{bx}$. Foi observado que quanto maior o grau da equação, a sua curva se aproximava cada vez mais do formato da letra U. O que resultava em uma distribuição não muito uniforme das curvas no plano, fazendo com que nas proximidades do PIN e do PIF, a distância entre as curvas fosse muito pequena.

Após o estudo inicial, foram estudadas as linhas de força eletrostática geradas por duas cargas de mesma intensidade e sinais opostos, como ilustra a Figura 5(a). A partir dessa imagem, foi intuitivo associar o PIN à carga $+q$, o PIF à carga $-q$ e as trajetórias de referência às linhas de força, conforme ilustra a Figura 5(b). Observou-se que a disposição das curvas que interligam as cargas é muito mais uniforme do que a das curvas geradas pelas demais equações avaliadas.

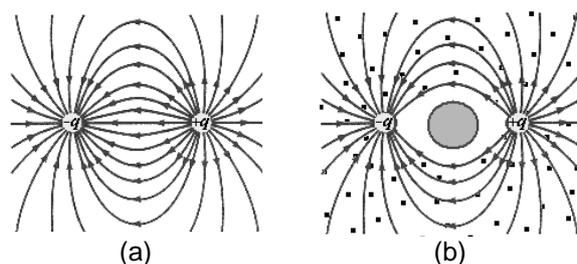


Figura 5 - Associação das linhas de força com as trajetórias de referência

Além disso, as linhas de força possuem características muito apropriadas para o IDEA. Por exemplo: dadas duas cargas de sinais opostos, infinitas linhas de força saem do pólo positivo e chegam ao pólo negativo. E todas as linhas de força são necessariamente disjuntas. Por fim, constatou-se que a equação de linhas de força possui outras características adequadas para sua utilização pelo IDEA, conforme descrição no texto que segue. Em [Muresan e Alin 1996], foi apresentada a seguinte equação para descrever as linhas de força:

$$q \left(\frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2+y^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2+y^2}} \right) = K, \quad (2)$$

onde q é a intensidade das duas cargas, posicionadas nos pontos $(a, 0)$ e $(-a, 0)$, e K é uma constante Real pertencente ao intervalo $[0, 2q]$. Para o IDEA, a Equação (2) possui um único coeficiente, K , já que valor q pode ser sempre assumido como sendo igual a 1 e o valor de a como a metade da distância entre o PIN e o PIF. Assim, a mensagem REQD só precisa conter um único coeficiente. Isto permite uma redução no *overhead* que seria gerado pela transmissão de múltiplos coeficientes, caso alguma das outras equações analisadas fosse adotada. Dessa forma, dentre as equações avaliadas, a das linhas de força se mostrou a mais adequada para definir as trajetórias de referência. Por isso, decidiu-se, para este trabalho, utilizar a Equação (2) na avaliação do IDEA.

A outra decisão necessária à avaliação do IDEA é a escolha de um método para se atribuir valores aos coeficientes da equação e, conseqüentemente, definir os múltiplos caminhos de desvio. O método desenvolvido para este trabalho consiste na escolha de três pontos distintos E_1 , E_2 e E_3 sobre o eixo y e, a partir das coordenadas de cada um desses pontos, obter os valores K_1 , K_2 e K_3 através da Equação (2). A posição de E_1 coincide com o ponto cuja distância (R) para a região de anomalia é igual ao raio de alcance de um sensor e está o mais próximo do ponto P (definido na Seção 3.4). Já os pontos E_2 e E_3 estarão a uma distância $2R$ e $3R$, respectivamente, para a região de anomalia e também o mais próximo do ponto P . Essa abordagem proporciona a criação de três desvios distintos (não necessariamente disjuntos).

Por fim, os pesos P_1 , P_2 e P_3 foram considerados iguais a 1, ou seja, definiu-se que tanto a energia remanescente, como o ganho angular e a distância para a trajetória de referência teriam a mesma influência na construção dos desvios.

4.2. Métricas, Parâmetros e Cenários de Simulação

O objetivo inicial das simulações foi identificar o impacto da construção dos desvios na entrega das mensagens de dados e determinar a densidade mínima da rede para que o IDEA consiga construir múltiplos desvios. Uma vez estabelecida essa densidade mínima, a mesma foi considerada no estudo de métricas de desempenho do protocolo em função do raio da região de anomalia. As seguintes métricas foram estudadas:

- **Mensagens de Dados Recebidas (MDR)**: define a percentagem das mensagens de dados enviadas pela fonte e que foram recebidas pelo *sink*;
- **Cenários com Sucesso na Construção de Desvios (CSCD)**: estabelece quantos por cento dos cenários simulados conseguiram construir pelo menos um desvio;
- **Nós na região de anomalia (NRA)**: expressa a percentagem dos nós da rede que foram comprometidos pela anomalia;
- **Quantidade de Desvios Construídos (QDC)**: é o número de caminhos distintos criados para se desviar as mensagens de dados;
- **Número de Saltos (NdS)**: determina o número de nós entre a fonte e o *sink* através dos quais foram encaminhadas as mensagens de dados;
- **Energia Consumida pelas Transmissões (ECT)**: é o total de energia que um sensor gasta com a transmissão de mensagens.

Em todas as simulações, a fonte foi incumbida de enviar 1000 mensagens de dados para o *sink* a uma frequência de 2 mensagens/s. O tempo de simulação não foi

determinado em segundos, pois o mesmo poderia variar dependendo dos cenários. A configuração de vários parâmetros da rede foi baseada em [Intanagonwiwat et al. 2002]. Dentre esses, destacam-se o tamanho das mensagens de dados, com 64 *bytes*, o período para o reenvio de *requests* (conhecidas como interesses), a cada 30 s, e o modelo da camada MAC 802.11, cuja taxa de transmissão foi configurada para 1,6 Mb/s. Entretanto, para refletir melhor o funcionamento dos rádios de sensores sem fio, os seguintes valores relativos ao consumo de energia foram adotados: 0,660 W em transmissões, 0,395 W em recepções e 0,035 W quando em *idle*. Além disso, para o IDEA, adotou-se um raio de comunicação de 40 metros.

A distribuição dos sensores foi feita utilizando-se o gerador de cenários *setdest* do ns-2. Essa distribuição foi feita sobre uma superfície de 500x500 m². Para avaliar o impacto da densidade da rede, foram gerados cenários com as seguintes densidades de nós por 1.000 m² : 1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 2,8 e 3,2. Para cada uma dessas densidades, também foi variado o raio da região de anomalia de 50 a 90 metros em passos de 10 metros. Então, para cada combinação de densidade e raio da região de anomalia foram simulados 20 cenários diferentes. Para os experimentos realizados após a determinação da densidade mínima, em alguns casos foi necessário simular cenários adicionais cujas regiões de anomalia possuísem raio superior a 90 metros: 110, 130, 150 e até 170 m.

Nos 90 segundos iniciais de cada simulação, a rede foi projetada para funcionar sem anomalias. Só após esses 90 segundos, foi programada a detecção de uma região de anomalia centrada no ponto (250 m, 250 m). Para se induzir a passagem das mensagens através da região de anomalia, o *sink* e a fonte foram fixados nos pontos (430 m, 250 m) e (70 m, 250 m) respectivamente.

4.3. Análise dos Resultados das Simulações

Os resultados referentes ao impacto da construção dos desvios na entrega das mensagens de dados são apresentados na Figura 6(a). Esses resultados mostram que a quantidade de mensagens de dados recebidas fica em torno de 86% quando a densidade da rede é de 2,4 nós / 1000 m². A perda das mensagens ocorre uma vez que a fonte não é notificada quando uma região de anomalia é detectada. Dessa forma, todos os dados enviados são descartados até que um desvio seja construído. A análise desses resultados revelam que, quanto menor a densidade, menor a quantidade de dados recebidos. Em redes com densidades menores, o IDEA nem sempre consegue construir um desvio logo na primeira trajetória de referência adotada. Em alguns casos, apenas após o recebimento do segundo ou terceiro *request*, é que um desvio é estabelecido. Dessa forma, o tempo necessário para que isso aconteça provoca uma maior perda das mensagens de dados.

A Figura 6(b) mostra o percentual de sucesso do IDEA em construir desvios de acordo com a densidade de nós na rede. Foi possível verificar que a partir de 2 nós / 1000 m², para todos os cenários simulados, o IDEA conseguiu estabelecer pelo menos um desvio. Em termos absolutos, isso significa que se forem distribuídos 500 nós com raio de alcance de 40 m sobre uma superfície de 500x500 m², o IDEA será capaz de contornar uma região circular de raio igual a 90m. Entretanto, apenas a partir de 2,0 nós / 1.000 m², foi possível observar em todos os cenários a construção de múltiplos desvios. Por isso, essa última foi considerada a densidade de mínima e a adotada nos demais experimentos. A fim de se avaliar o que isso representa em termos relativos, foi

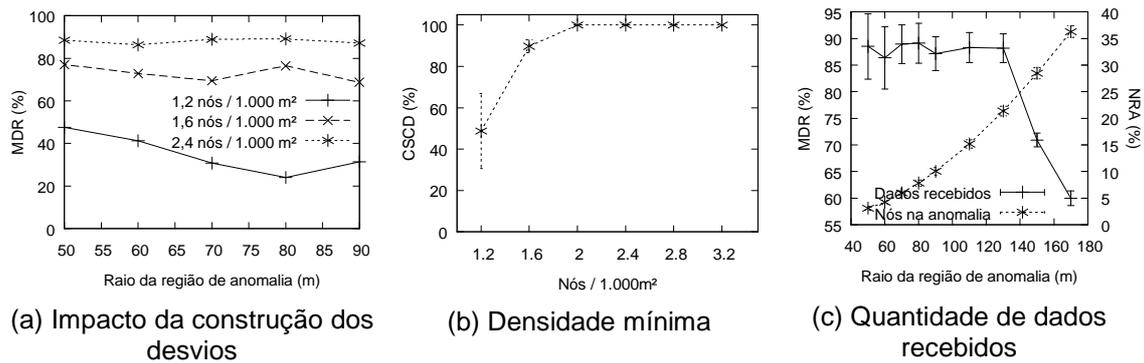


Figura 6 - Resultados das simulações

utilizada a expressão definida em [Gupta et al. 2006] para determinar se uma rede de sensores é densa: $N > (4 \times s/t)^2$, onde N é o número de nós na rede, s é a metade do comprimento de uma das dimensões (considerando superfícies quadradas) e t é o raio de transmissão do sensor. Aplicando-se nessa expressão os valores dos parâmetros definidos para as simulações, obtém-se $N > 625$. Dado que o IDEA conseguiu construir múltiplos desvios com 500 nós, isso mostra que o protocolo pode operar em redes que ainda não são consideradas densas.

No cenário com 100 nós a menos (1,6 nós / 1000m²), as chances do IDEA conseguir construir um desvio já são reduzidas em aproximadamente 10%. Além disso, as simulações também mostraram que em alguns cenários com densidade de 1, 1,5 e até 2 nós / 1000 m² o GEAR não foi capaz de estabelecer um caminho entre a fonte e o *sink*. Ao contrário do IDEA que, nas mesmas condições, construiu um ou mais desvios.

O resultado sobre a quantidade de mensagens de dados recebidas pelo *sink* é apresentado na Figura 6(c). Em redes nas quais a região de anomalia possui até 130 m de raio, a quantidade de mensagens recebidas se mantém em torno de 87% das mensagens transmitidas pela fonte. Quando o raio da anomalia é modificado para 150 ou 170 m, observa-se que a quantidade de mensagens de dados perdidas pode chegar a até 40% das enviadas. Quando a região de anomalia possui um raio de 130 m, cerca de 20% dos nós da rede já estão comprometidos pela região de anomalia. Esse representa o limite a partir do qual a quantidade de mensagens recebidas diminui drasticamente.

A partir da Figura 7(a) é possível constatar que o número de desvios construídos é superior a três (quantidade inicialmente programada). Isso aconteceu pois a utilização da energia remanescente como um dos fatores da Equação (1) provoca uma variação na escolha do próximo salto. A média de desvios construídos se mantém próxima de 5 para regiões de anomalia com até 110 m de raio. Entretanto, para valores acima deste, há uma queda mais acentuada na quantidade de desvios construídos. Isso acontece principalmente por causa da quantidade de nós comprometidos pela região de anomalia.

As barras verticais do gráfico apresentado na Figura 7(b), ao contrário dos demais, não representam o intervalo de confiança. Nesse caso, o ponto inferior dessas barras representa o menor número de saltos utilizados para se construir um desvio. Já o ponto superior representa o maior número de saltos e o marcador indica a média. A análise dos resultados mostra que o aumento do raio da região de anomalia provoca um crescimento suave no número de saltos. Além disso, quando a região de anomalia começa a atingir um tamanho muito grande (150 e 170 m de raio), a média do número

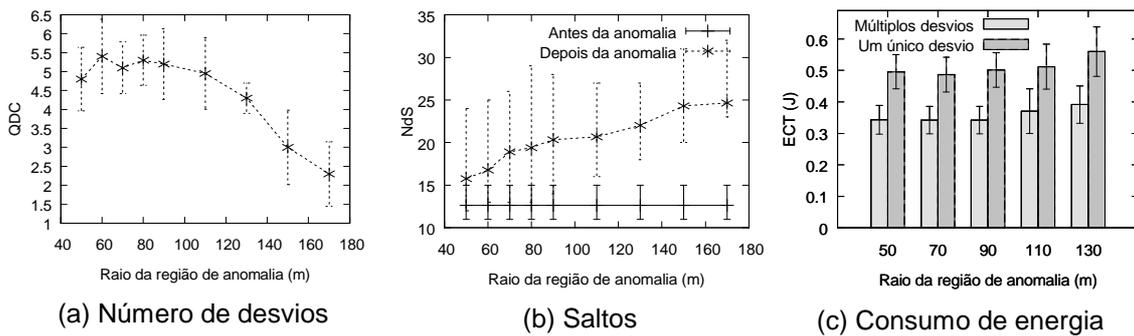


Figura 7- Resultados das simulações

de saltos começa a estabilizar em torno de 24 e o seu máximo não ultrapassa os 32 saltos. Isso ocorre, pois na proporção em que o raio da região de anomalia aumenta muito, apenas as trajetórias mais longas conseguem produzir desvios. Contudo, ao se comparar o número de saltos antes e depois da anomalia, percebe-se que há um aumento considerado de saltos. No melhor caso, quando a anomalia possui um raio de 50 m, o número de saltos aumenta em 24,86%. E no pior caso, quando o raio da anomalia é de 170 m, o aumento é de 95,17%.

O IDEA utiliza múltiplos desvios para balancear o consumo de energia dos nós envolvidos. Contudo, foi observado que a economia total de energia é muito pequena. Isso se deve ao fato de que na maior parte do tempo os sensores estão no estado *idle*. Como exemplo, considere os dados extraídos de um sensor após uma simulação: energia total consumida: 29,65 J; energia consumida em *idle*: 20,47 J; energia consumida pelas transmissões: 0,23 J; energia consumida pelas recepções: 8,95 J. Apesar do parâmetro de consumo para as transmissões ter sido configurado com um valor 94,7% maior do que para o estado *idle*, note que a energia consumida nesse segundo estado equivale a 69,04% do total enquanto a energia desprendida nas transmissões representa apenas 0,76%. Entretanto foi observada uma redução considerável no consumo de energia com as transmissões das mensagens. A Figura 7(c) mostra um comparativo desse consumo em cenários com e sem múltiplos desvios. Através dela, constata-se que, com múltiplos desvios, o consumo de energia médio com as transmissões teve uma redução de aproximadamente 30%.

5. Considerações Finais

Este artigo apresentou o IDEA, um protocolo capaz de isolar e construir múltiplos desvios em torno de uma região de anomalia. Como prova de conceito das idéias apresentadas, o IDEA foi implementado no ns-2 e teve o seu desempenho avaliado. Para essa avaliação, foram adotadas linhas de força eletrostáticas para as trajetórias de referência. Nas simulações realizadas, foi observado o bom desempenho do IDEA. Mesmo em redes com um número de nós inferior às consideradas densas, o IDEA foi capaz de construir desvios com uma pequena perda de mensagens durante esse processo. Os resultados mostram a eficiência do IDEA em realizar desvios de regiões de anomalias com um balanceamento de carga decorrente da utilização de múltiplos caminhos. Em particular, o balanceamento de carga por múltiplos desvios permitiu uma redução de até 30% no consumo de energia com a transmissão de mensagens.

Um dos pontos positivos do IDEA é a sua potencialidade para trabalhos futuros. A flexibilidade na escolha da equação de desvio e na configuração dos pesos da

expressão que calcula o custo do próximo salto possibilita que vários estudos sejam realizados a fim de se avaliar diferentes implementações do IDEA. Além disso, também é possível estudar melhorias no sentido de se suportar e avaliar o IDEA em redes com múltiplas regiões de anomalia.

Referências

Brandão, H. (2009). IDEA: Um Protocolo para o Isolamento e Desvio de Anomalias em Redes de Sensores. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco*.

Fang, Q., Gao, J., & Guibas, L. J. (2006). Locating and Bypassing Holes in Sensor Networks. In *Mobile Networks and Applications*, 11 (2), pp. 187-200.

Gupta, H., Das, S. R., & Gu, Q. (2006). Connected Sensor Cover: Self-Organization of Sensor Networks for Efficient Query Execution. In *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 14 (1), pp. 55-67.

Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin, D. (2002). Directed Diffusion: a Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 56-67.

Jia, W., Wang, T., Wang, G., & Guo, M. (2007). Hole Avoiding in Advance Routing in Wireless Sensor Networks. In *Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 3519-3523.

Karp, B., & Kung, H. T. (2000). GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 243-254.

Krishnamachari, B., & Iyengar, S. (2004). Distributed Bayesian Algorithms for Fault-tolerant Event Region Detection in Wireless Sensor Networks. In *IEEE Transactions on Computers*, pp. 241-250.

Muresan, & Alin, D. (1996). Electrostatic Fields of Point Charges Studied on the Computer. *Scientific Communications Session, University of Bucharest*, URL: <http://alumnus.caltech.edu/~muresan/projects/esfields/field.html>, Dezembro.

Niculescu, D. (2004). Positioning in Ad Hoc Sensor Networks. In *IEEE Network*, 18 (4), pp. 24-29.

Ssu, K.-F., Chou, C.-H., Jiau, H. C., & Hu, W.-T. (2006). Detection and Diagnosis of Data Inconsistency Failures in Wireless Sensor Networks. In *The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 50 (9), pp. 1247-1260.

Strikos, A. A. (2007). A Full Approach for Intrusion Detection in Wireless Sensor Networks. *School of Information and Communication Technology, KTH, Estocolmo*, URL:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.102.3855&rep=rep1&type=pdf>, Dezembro.

Tian, Y., Yu, F., Choi, Y., Park, S., Euisin, L., Jin, M., et al. (2008). Energy-Efficient Data Dissemination Protocol for Detouring Routing Holes in Wireless Sensor Networks. In *IEEE International Conference on Communications*, pp. 2322-2326.

Yu, F., Park, S., Tian, Y., Jin, M., & Kim, S.-H. (2008). Efficient Hole Detour Scheme for Geographic Routing in Wireless Sensor Networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 153-157.