

SOLUÇÕES DE REDUÇÃO DE CONSUMO ENERGÉTICO PARA REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSFs) APLICADAS À AMBIENTES FLORESTAIS

Paulo César Sedrez Moncks¹, Cristian Rocha Pereira¹, Matheus Santos da Silva¹, Adenauer Correa Yamin¹
¹ Programa de Pós-Graduação em Computação, Universidade Federal de Pelotas - UFPel, 96010-900, Pelotas, Brasil.

*E-mail: pcsmoncks@inf.ufpel.edu.br

Recebido em: 03/02/2016
Aceito em: 28/04/2016

RESUMO

Redes de sensores sem fio (RSSFs) têm sido utilizadas para aplicações de monitoramento nos mais diversos cenários, como controle industrial, gerenciamento de tráfego, segurança pública, automação residencial, saúde e também monitoramento ambiental. Estas redes são compostas de sensores com restrição de recursos onde a eficiência energética é parte essencial para sua real aplicabilidade. É apresentada neste artigo a sistematização feita das características de três técnicas para redução do consumo energético das redes de sensores sem fio, e como principal objetivo desta sistematização espera-se fornecer elementos para avaliar a aplicabilidade de RSSFs nas tarefas de predição de risco e monitoramento de incêndios florestais. Foi possível concluir que o uso de RSSFs aplicadas a ambientes florestais ainda é uma frente de pesquisa em aberto, sobretudo no que se refere à durabilidade da vida útil da rede. Ainda que as técnicas de redução de consumo energético propostas nos trabalhos avaliados apresentem ganhos, é necessário aprofundar as pesquisas para alcançar um tempo maior de duração das baterias e com isso tornar viável a instalação de nodos em florestas.

Palavras-chave: rede de sensores sem fio. eficiência energética. monitoramento de incêndios florestais.

1 Introdução

Incêndios florestais são motivos de preocupação em âmbito mundial devido aos prejuízos por eles causados, tanto no aspecto econômico quanto na biodiversidade [1].

Particularmente, as áreas de proteção ambiental - áreas de relevante interesse ecológico e reservas extrativistas - no Brasil são monitoradas pelo Centro Nacional de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais - PrevFogo através de imagem por satélite [2]. Entretanto, mesmo com um número considerável de satélites sendo utilizados, algumas queimadas não são possíveis de serem detectadas. As seguintes condições impedem ou prejudicam a detecção das queimadas:

- Frentes de fogo com menos de 30 m;
- Fogo apenas no chão de uma floresta densa, sem afetar a copa das árvores;
- Nuvens cobrindo a região;
- Queimada de pequena duração, ocorrendo entre as imagens disponíveis;
- Fogo em uma encosta de montanha, enquanto que o satélite só observou o outro lado;
- Imprecisão na localização do foco de queima, que no melhor caso é de cerca de 1 km, mas podendo chegar a 6 km.

A localização dos focos de queimadas apresentada em trabalhos de validação indica que o erro é em média de ~400 m, com desvio padrão de ~3 km; cerca de 80% dos focos estão em um raio de 1 km das coordenadas indicadas [2].

No que tange a florestas plantadas, o método mais comumente utilizado para detecção de incêndios é a torre de observação, onde as chamas e/ou fumaça são detectados por meio de observação. O SADI (Sistema Automático de Detecção de Incêndios), sistema que utiliza-se de câmeras para vigilância, é muito usado na Europa e, recentemente, começou a ser aplicado pelas indústrias de celulose no Brasil. Contudo, esta técnica também tem suas limitações, conforme apresentado por [3]:

- Alto índice de alarmes falsos;
- Baixo desempenho à noite;
- Grande uso de largura de banda na transmissão das imagens;
- Variabilidade da luminosidade das cenas;
- Não visualiza o foco de incêndio por detrás das árvores ou relevos acidentados;
- Condições climáticas desfavoráveis reduzem o desempenho;
- Alto custo.

Por sua vez, o trabalho de [4] mostra que dentre as dificuldades na identificação inequívoca da fumaça, encontra-se a presença de nuvens, sombras, formação de partículas de poeira, reflexos, etc. e os indica como fatores geradores de Falsos Positivos, embora ressalte que a fumaça seja um elemento relevante para a detecção de incêndio.

A eficiência no combate aos incêndios florestais está diretamente ligada à rapidez na detecção e precisão na localização do evento, minimizando assim os danos causados. A melhor forma de combater um incêndio florestal é através de sua prevenção [5]. Diante disso, é usual o emprego de indicadores de riscos de incêndio para monitoramento de áreas florestais. Sua estrutura é baseada na relação entre incêndios florestais já ocorridos e os elementos meteorológicos sensoreados. A intensidade e velocidade com que avança um incêndio estão diretamente ligadas à umidade relativa do ar, à temperatura, à velocidade do vento e à precipitação [6].

Abordagens capazes de propiciar monitoramento de uma área maior, com envio de dados em intervalos menores ou até mesmo *on-line*, seriam aquelas baseadas em RSSFs (Redes de Sensores Sem Fio). Contudo, as RSSFs apresentam pontos que ainda precisam ser resolvidos:

- Robustez dos equipamentos - a área a ser sensoreada é de difícil acesso para substituição/manutenção;
- Consumo energético - redes de sensores sem fio normalmente têm como fonte de energia baterias, e estas tem vida útil restrita.

Uma RSSF é composta basicamente de nós sensores de baixo custo, alimentados por bateria, que têm a capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação sem fio [7].

A vida útil de uma RSSF é afetada por muitos fatores. Estes incluem arquitetura de rede, o tamanho da rede, o modelo de população de nós sensores, a taxa de geração de dados de sensoriamento, a carga inicial da bateria disponível em cada sensor e protocolos de comunicação de dados [8].

Memória, bateria, dispositivos de transmissão e processamento são os principais componentes dos nós sensores. Geralmente estes nós são espalhados por áreas de grandes dimensões e de difícil acesso, e devem operar sem intervenção humana por um longo período de tempo. Para tanto, o consumo de energia deve ser o mínimo possível, caso contrário o nó poderá esgotar sua capacidade de funcionamento e desconectar-se da rede, prejudicando o propósito geral. Portanto, o consumo da bateria do nó sensor deve ser o mais otimizado possível, evitando com isso que a rede tenha suas funcionalidades comprometidas. É importante observar que o processo de transmissão nos nós sensores é a atividade que mais consome energia.

Considerando todos estes aspectos, e tendo por base o estudo feito em [9], o qual aponta o emprego de RSSFs enquanto uma solução viável para o monitoramento ambiental considerando a relação entre desempenho e custo, o objetivo

central deste trabalho é identificar técnicas que visam a otimização do consumo energético de redes de sensores sem fio, na expectativa de avaliar a possibilidade do uso real das RSSFs na predição de risco e monitoramento de incêndios de áreas florestais.

Este trabalho foi desenvolvido de acordo com a seguinte metodologia: Primeiro foi feito um estudo sobre os diferentes aspectos dos problemas da temática de prevenção de incêndios florestais. Posteriormente foi feito um levantamento de trabalhos relacionados a detecção de incêndios florestais. Foram selecionados os trabalhos que exploravam o uso de redes de sensores sem fio. Por fim, dentre estes trabalhos, foram considerados para elaboração do estudo aqueles comprometidos com a eficiência energética que é o tema central que se desejava explorar, além de serem trabalhos propostos a sensorear qualquer tipo de floresta. Uma vez selecionados os trabalhos entendidos como relevantes, foi feita uma sistematização dos mesmos, sendo caracterizadas as principais vantagens e desvantagens de cada solução proposta. Como última etapa, a metodologia adotada compreendeu uma comparação entre os trabalhos pesquisados, sendo identificados um dos principais desafios que constituem o estado-da-arte desta frente de pesquisa.

Este artigo está estruturado na seguinte forma: na seção 2 é tratado o consumo de energia, dando uma visão geral e destacando algumas características do consumo energético em RSSF. Na seção 3 foi abordada a metodologia para a seleção dos projetos. Na seção 4 são apresentados os projetos relacionados. Já na seção 5 são apresentadas as considerações finais com o posicionamento dos autores sobre o assunto. Finalmente na seção 6 é feita a conclusão do trabalho.

2 Consumo de Energia

O consumo de energia em uma RSSF (Rede de Sensores sem Fio) sempre foi visto como fator principal a ser considerado na maioria dos projetos. Por causa da escassez das fontes de energia, métodos de economia de energia devem ser utilizados em todos os aspectos possíveis. Por este motivo muitas pesquisas têm sido feitas para melhorar o tipo de transmissor e também os métodos e algoritmos responsáveis por encaminhar as informações na rede de forma mais eficiente possível.

Em [10] é tratado em RSSF a divisão do consumo de energia em três domínios, conforme apresentado na figura 1:

- Sensoriamento;
- Comunicação;
- Processamento de dados.

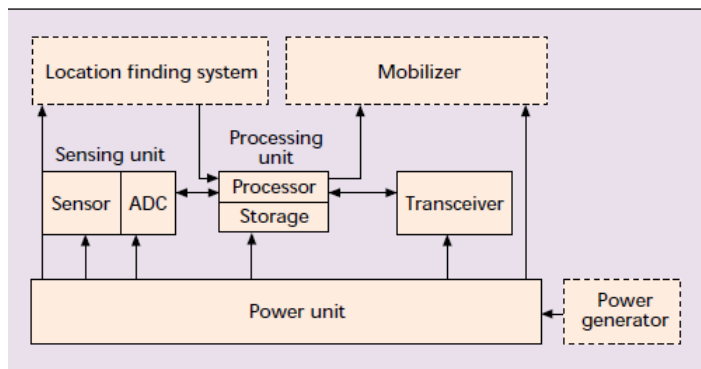


Figura 1 – Componentes de um nó sensor [10]

Redes de sensores podem possuir vários tipos de sensoriamento, normalmente com baixa frequência de amostragem. Tais sensores podem ser usados para sensoriamento contínuo ou apenas detecção de um evento, além da possibilidade de acionarem atuadores locais; a forma de utilização do sensoriamento implica diretamente no consumo energético da rede de sensores.

Quanto à comunicação, alguns fatores devem ser levados em conta. Os nós-sensores gastam a maior parte de sua energia na transmissão e recepção de dados. Observa-se que, para comunicações em pequenas distâncias, a quantidade de energia que se gasta para transmissão e recepção é quase a mesma.

Já no processamento de dados, mesmo diante do contínuo surgimento de novos processadores cada vez mais eficientes do ponto de vista energético, temos o fator consumo como fundamental.

Em seu estudo, [10] afirma que alguns autores argumentam que seria o caso de se criar estratégias de organização de uma CPU onde a principal preocupação seria a energia gasta, e que métodos de economia de energia devem ser empregados sempre que possível nas CPUs dos nós-sensores.

3 Revisão de Literatura

No trabalho desenvolvido, a revisão de literatura foi realizada com base nas pesquisas de [11], [12] e [13], as quais podem ser retratadas da seguinte maneira:

No trabalho de [11], é proposto um modelo de sistema para previsão de perigo de incêndio baseado em redes de sensores sem fio (WSN-WFHP). O modelo foi aferido através de conjuntos de dados de incêndios reais e aspectos técnicos observados através de simulações.

Em [12] é proposto um protocolo genérico voltado à aplicação, que pode ser utilizado quando não existir restrição no tempo de resposta das requisições. A principal preocupação do projeto é a questão energética. Considerando o aspecto remoto em que devem operar as redes para monitoramento florestal, esta

pesquisa se mostrou uma alternativa interessante para aplicações de previsão de incêndios em ambientes florestais..

Já na pesquisa de [13], é apresentado o desenvolvimento de um sistema de rede de sensores sem fio para detecção precoce de incêndio florestal, baseando-se na baixa taxa de comunicação em redes de curto alcance e topologia ponto-a-ponto.

A metodologia da revisão foi definida baseada em dois construtos principais:

- Redes de sensores sem fio e
- Uso de RSSFs na previsão ou detecção de incêndios florestais.

As palavras-chave para alimentar os motores de busca foram "WSN", "Forest Fire", "Wildfire", "Prediction" e "Detection".

Em seguida foram aplicados filtros em relação ao ano de publicação de 2010 até 2015, correlacionados com o tema: Sistemas de previsão e detecção precoce aplicados a incêndios florestais com RSSF.

Todo o esforço de estudo e pesquisa realizado quando da revisão de literatura teve por meta buscar respostas para a questão central contemplada nos objetivos do trabalho:

- O uso de redes de sensores sem fio é aplicável nas tarefas de previsão de risco e monitoramento de incêndios florestais?

4 RSSFs em Ambientes Florestais: Revisão de Literatura

No trabalho de [11] foi proposto um modelo de sistema para previsão de perigo de incêndio baseado em redes de sensores sem fio (WSN-WFHP). O sistema WSN-WFHP (do inglês "Wireless Sensor Network based Wildfire Hazard Prediction") consiste em uma rede de sensores sem fio organizada em um conjunto de duas camadas de nós sensores meteorológicos, como mostrado na Figura 2.

Os nós sensores meteorológicos são sensores de baixo custo capazes de capturar dados meteorológicos, processar as informações e transmiti-las utilizando comunicação sem fio de curto alcance. Os nós sensores calculam parcialmente o risco de incêndio e executam a pilha de protocolo de comunicação para ter certeza da conectividade, organização e integridade da rede.

O primeiro nível do sistema WSN-WFHP consiste nas ligações entre os nós sensores e nós centralizadores, enquanto o segundo nível consiste na ligação entre os centralizadores e o *sink* (nó coordenador central).

O primeiro passo é a estabilização da rede. Após isso, o nó concentrador transmite valores de velocidade do vento e precipitação aos membros do seu conjunto e espera suas respostas por um período de tempo pré-definido. O nó sensor recebe os valores, capta a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar, e com base em todos esses dados calcula índices parciais de WFHP. Cada nó sensor transmite então os índices apurados ao seu concentrador. O concentrador, por sua vez, recebe a informação do índice e transmite para o *sink*. O *sink*

transmite a informação do semi-WFHP para uma central de dados, e esta por sua vez calcula o índice para cada posição de nó sensor.

Estes dados são então armazenados em banco de dados que alimenta uma aplicação de retaguarda para serem analisados, e este ciclo é repetido de forma constante até que o resultado da aplicação do PC sugira a reconfiguração do sistema.

O sistema possui ainda duas características especiais:

- Nodos móveis:
 - São hóspedes autorizados a entrar e sair da rede sempre que desejarem;
 - São normalmente utilizados nas roupas dos bombeiros ou em veículos de combate a incêndios;
 - São equipados com sensores de sinais vitais e possuem a premissa de poder transmitir os dados diretamente ao *sink* em nome do nodo concentrador mais próximo, aliviando a carga de trabalho dos nodos concentradores.
- Nodo de segurança:

- Permanecem em modo de escuta ociosa até que descubram que o nodo concentrador se encontra em nível crítico de capacidade de energia ou em mau funcionamento. Em tais situações, os nodos de segurança imediatamente assumem o papel do nodo concentrador. Os nodos concentradores rebaixados, por sua vez, assumem o papel de nodo de segurança e têm a oportunidade de recarregar sua bateria através de um painel solar instalado.

O modelo WSN-WFHP foi aferido através de conjuntos de dados de incêndios reais, e os resultados foram semelhantes aos do sistema *Fire Weather Index* (FWI), baseado em comunicação por satélite (figura 3).

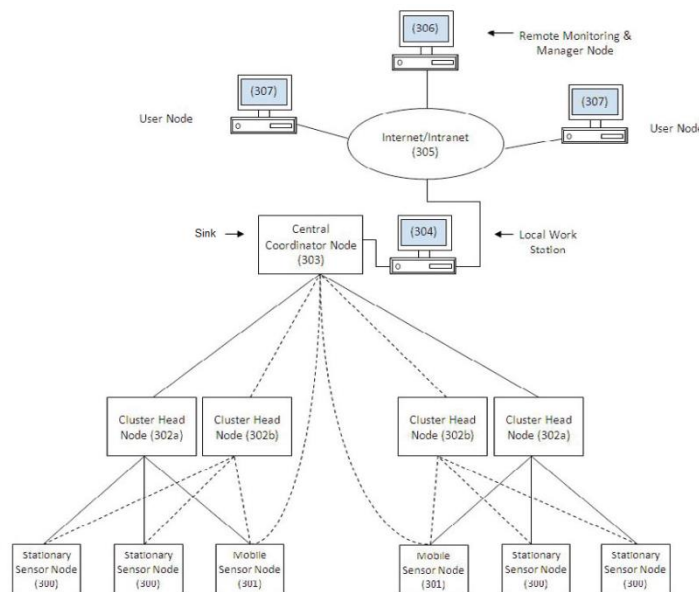


Figura 2 – Organização do cluster do modelo WSN-WFHP proposto. Modificada a partir de: [11].

O sistema FWI foi desenvolvido originalmente para estimar o perigo de incêndio florestal no Canadá, e teve sua primeira emissão em 1970. É composto de diferentes componentes que fornecem informações sobre a umidade do combustível, taxa de propagação do fogo, consumo de combustível e intensidade do fogo. Cada componente é determinado com base na informação recolhida a partir de leituras temporais [14]. Na pesquisa de [11], o conjunto de dados reais foi composto por 24 fichas de velocidade do vento, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, medidos por

hora ao longo de 24 horas. Esta experiência foi repetida para um número diferente de nós sensores (16 a 200). Do ponto de vista de previsão de perigo de incêndio, comparado ao FWI, o modelo apresentou erro de cálculo na ordem de cerca de 15% em todos os casos.

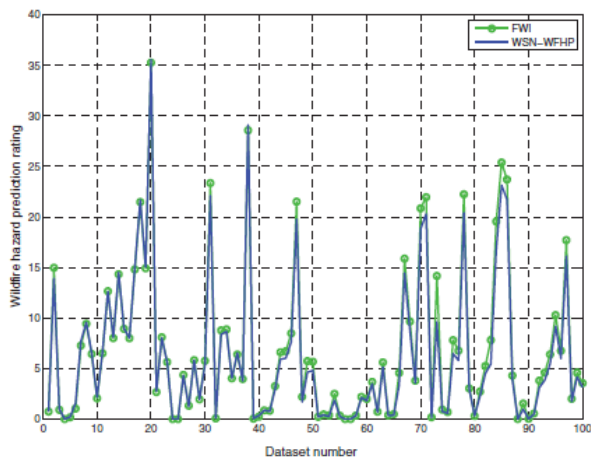


Figura 3 – Comparação entre WSN-WFHP e FWI [11].

O atraso de transferências de dados, perda de pacotes e desempenho de consumo de energia foram observados através de simulações.

A configuração de simulação inicial consistiu de 16 nós sensores auto-organizados autonomamente com dois concentradores. Uma vez que a rede sem fio é estabilizada, os nós sensores adquirem dados meteorológicos a partir de um arquivo de entrada específica e enviam índices de risco de incêndio parciais aos seus respectivos concentradores a cada 30 segundos. Os nós concentradores, baseados nos índices que receberam, calculam índices de perigo de incêndio e transmitem o mesmo para o *sink* para posterior processamento. A configuração de simulação inicial consistia apenas de 16 nós sensores para efeitos de verificação de risco de incêndio. No entanto, o resto da simulação consistiu em até 200 nós sensores e 25 concentradores dentro de uma área de 1,72 quilômetros quadrados para imitar uma RSSF (Rede de Sensores Sem Fio) naturalmente densa. O número mínimo de nós sensores utilizados em configurações de simulação para investigar o efeito do número de nós sensores nos resultados de previsão de fogo foi definido para 16. Isto porque as simulações mostraram que a rede com menos de 16 nós capturavam somente dados mínimos para medições como colisão de dados e latência de pacotes, o que não reflete a realidade das redes de sensores sem fio.

O atraso médio de ponta a ponta do modelo WSN-WFHP é mostrado na Figura 4. Esta é a soma dos atrasos de transmissão, propagação, processamento WFHP e de enfileiramento. Nesta simulação os nós sensores transmitem suas informações de previsão parcial a cada 60 segundos. Os concentradores processam pacotes de predição e os enfileiram para transmiti-los logo que o canal estiver disponível. Em 18 nós sensores e dois nós concentradores, o atraso máximo observado é de 10 segundos, com um atraso médio de 5.0747 segundos. Isto foi repetido para 54 nós de sensores e 6 concentradores e o resultado foi semelhante, como mostrado na Figura 5.

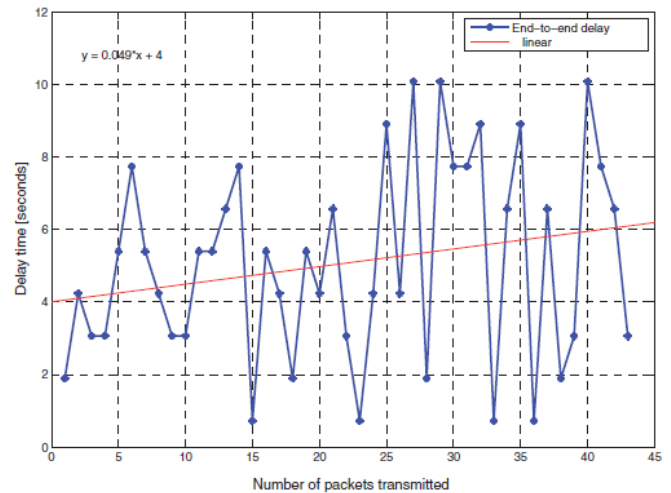


Figura 4 – Delay ponta a ponta para 18 nós sensores e 2 concentradores. [11].

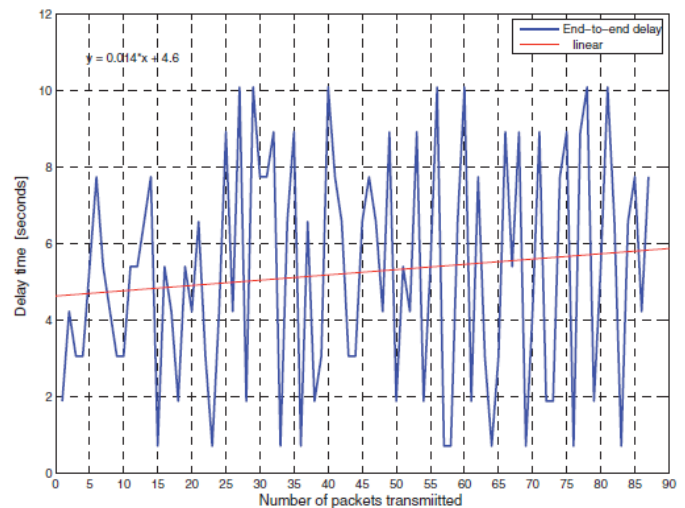


Figura 5 – Delay ponta a ponta para 54 nós sensores e 6 concentradores.. [11].

Observou-se também se a quantidade de pacotes perdidos tem um impacto significativo sobre os resultados de previsão de risco, através de simulação envolvendo nós sensores transmitindo pacotes de dados em diferentes períodos de transmissão. Os resultados obtidos, como mostrado na Figura 6, indicam que o número de perda de pacotes diminui exponencialmente à medida que os sensores transmitem pacotes de dados menos frequentemente para uma rede de 16, 54 e 90 nós sensores. Os resultados de previsão obtidos no âmbito deste cenário indicam que a perda de dados não é um problema em tais escalas de rede, desde que o número de perdas de pacotes não seja significativamente alto para um determinado conjunto de nós sensores. Isto também evidencia a tolerância a falhas do WSN-WFHP sob estas condições.

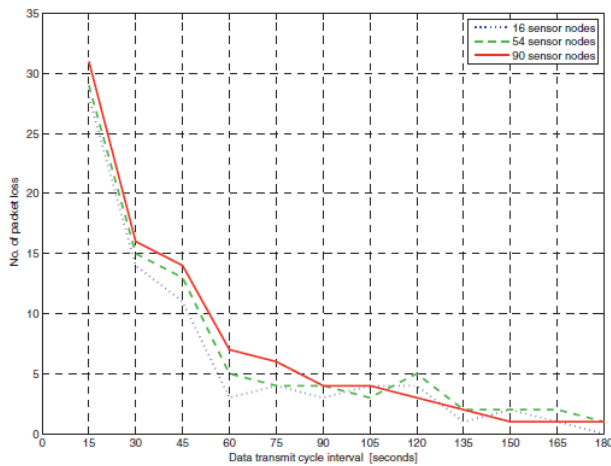


Figura 6 – Desempenho de perda de pacotes. [11].

O consumo de energia é analisado com base no modelo da bateria TrueTime. TrueTime é a ferramenta de simulação baseada em Simulink MATLAB que tem sido desenvolvida na Universidade de Lund desde 1999. Usando TrueTime, é possível simular simultaneamente aspectos físicos dos nós e seu meio ambiente, o *software* nos nós, a comunicação de rádio, protocolo de rede, entre outros [15].

O modelo calcula o consumo de energia da bateria devido ao processamento de dados do *kernel*, pacote de transmissão/recepção, e consumo em espera. O desempenho da bateria do modelo é mostrado na Figura 7. A fonte de energia é feita com duas pilhas AAA com 1200 mAh cada (2 x 1200 mAh). A figura mostra uma simulação da aplicação WSN-WFHP em execução contínua até que a carga restante da bateria seja inferior a 300 mAh para ambos os nós, sensores e concentradores.

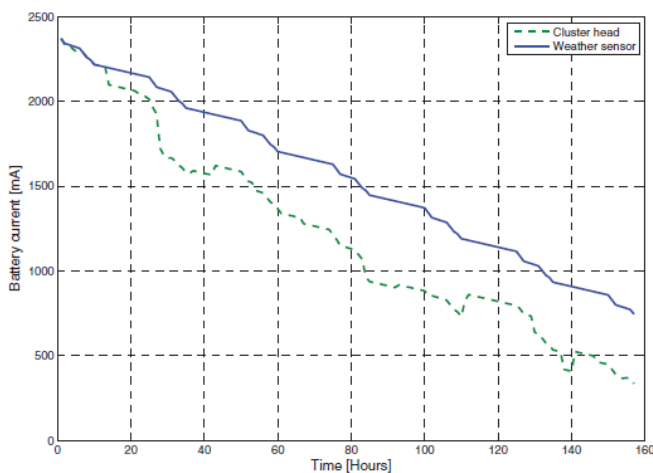


Figura 7 – Desempenho do consumo de energia. [11].

Os resultados das simulações indicam que para estes critérios o desempenho obtido com o modelo é perfeitamente tolerável.

Este sistema proporciona uma alta resolução espacial e temporal para cálculo de previsão de perigo de incêndio em termos de custos e eficiência energética, é facilmente implementável para situações de emergência e fornece meios de interações.

Já [12] propõe um protocolo genérico voltado à aplicação, para ser utilizado na troca de mensagens entre sensores em RSSF, ou entre estes e o *sink* da rede, quando não existe restrição no tempo de resposta das requisições. Em outras palavras, as respostas às solicitações ou notificações, chamadas genericamente de “requisições”, podem ocorrer em qualquer momento do tempo de vida da rede, após o recebimento da requisição equivalente.

O protocolo proposto é composto por três tipos de mensagens: solicitação (*P-Request*), resposta (*P-Response*) e reconhecimento (*P-ACK*). A mensagem *P-Request* envia algum tipo de informação para um elemento remoto (outro sensor ou o *sink*), enquanto a mensagem *P-Response* é uma mensagem de retorno (resposta) desse elemento remoto, sem restrição temporal com a requisição recebida previamente. A mensagem *P-ACK* é utilizada para fins de reconhecimento das outras mensagens do protocolo.

Os autores esperam que o protocolo possa ser utilizado em qualquer tipo de rede de sensores, que pode ou não implementar algum mecanismo para recuperação de erros. Já que a principal preocupação do projeto é a questão energética, foi optado por desenvolver um protocolo simples em que a confiabilidade da comunicação é feita em apenas uma via e com auxílio de dois contadores (*timeouts*), denominados *ta* e *tg*.

Conforme mencionado anteriormente, a mensagem *P-ACK* serve para reconhecimento das outras mensagens do protocolo; para tal, utiliza em conjunto os parâmetros *ta* e *tg*, onde *ta* representa o tempo que os sensores ou o *sink* devem esperar por uma mensagem *P-ACK* e *tg* define o tempo necessário para confirmar que a mensagem *P-ACK* foi recebida pelo destino correto, para determinar se a mensagem deve ser retransmitida. Os autores ainda definem que no máximo serão feitas 4 tentativas de retransmissão, a fim de evitar consumo indesejado de energia quando as rotas de transmissão atuais estão congestionadas ou inativas, e que a cada tentativa o valor de *ta* deve dobrar, mas após uma retransmissão bem sucedida o valor de *ta* deve ser reiniciado para o tempo de referência inicial. Um exemplo de um esquema do protocolo proposto em ação pode ser observado na Figura 8.

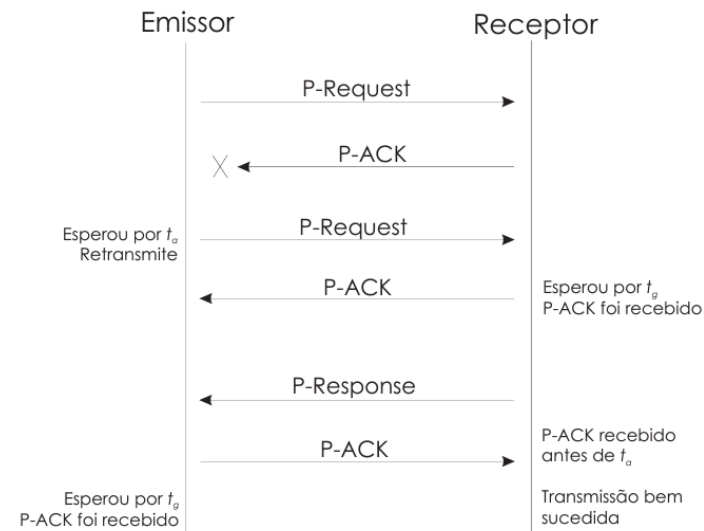


Figura 8 – Exemplo de um esquema de comunicação para o protocolo proposto [12].

Cabe ressaltar que o protocolo proposto emprega apenas duas mensagens para requisitar e receber informações de um elemento remoto. Para tanto, é utilizado controle por contadores que diminui o desempenho da comunicação, embora economize energia. Para verificar essas características, compara-se o consumo de energia do protocolo proposto em relação a um protocolo baseado em comunicações por dupla confirmação, como ocorre com o TCP (*Transfer Control Protocol*) nas redes Internet. Para tanto, é considerado o cenário de comunicação definido na Figura 9, em que 8 sensores utilizam o protocolo para solicitar algum tipo de informação ao *sink*.

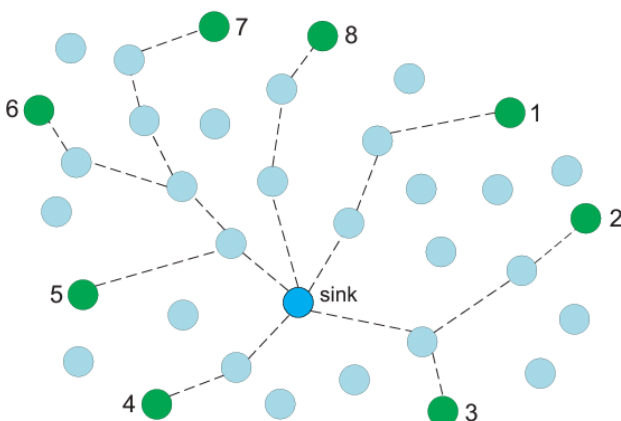


Figura 9 – Diagrama ilustrativo do cenário de comunicação considerado. [12].

Assumindo as mesmas configurações para o tamanho das mensagens, verifica-se o consumo de energia considerando que a cada hora é feito um processo de requisição/resposta utilizando o

protocolo proposto e utilizando esse protocolo com dupla confirmação (*three-way*), como apresentado na Figura 10.

Como o protocolo proposto envolve menos troca de mensagens, o consumo de energia esperado é menor, sendo potencialmente melhor para redes de sensores sem fio em relação a protocolos baseados em dupla confirmação. Assim, espera-se que o protocolo proposto possa beneficiar aplicações em RSSF sem restrições no tempo de resposta de requisições, sendo uma alternativa interessante para aplicações de predição de incêndios em ambientes florestais.

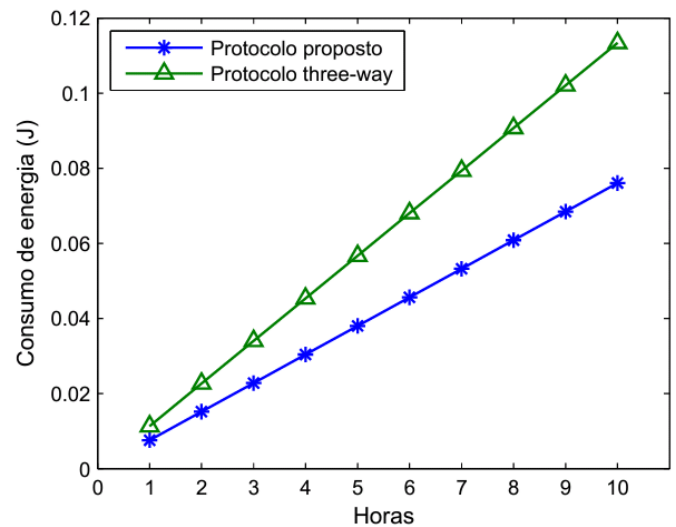


Figura 10 – Consumo de energia para o cenário considerado [12].

Em sua pesquisa, [13] apresenta o desenvolvimento de um sistema de rede de sensores sem fio para a detecção precoce de incêndio florestal. A aplicação proposta baseia-se na baixa taxa de comunicação de rede de área pessoal sem fio padrão IEEE 802.15.4. Os componentes centrais de *hardware* e *software* do nodo protótipo de rede para esse trabalho são descritos como: *hardware* de nodo sensor, metodologias de programação de microcontroladores e *networking*.

Após estas estratégias implementadas, uma atenção especial foi dada para chegar a um tratamento adequado de energia, essencial para alcançar uma bateria de longa duração.

A RSSF (Rede de Sensores Sem Fio) é composta por um conjunto de nós que monitoram parâmetros físicos do ambiente e transmitem os dados coletados para um coordenador (nodo centralizador) do sistema usando protocolos de comunicação sem fios de baixa potência. Cada nodo compreende várias partes:

- Um microcontrolador que controla e sincroniza o processo de aquisição de dados do sensor, o emissor-receptor e a operação de acesso à memória e armazenamento;
- Um conjunto de sensores para medir os parâmetros necessários. De modo a testar o desempenho dos vários

tipos diferentes de saída do sensor de codificação, as partículas incluem sensores com saída analógica, digital ou quase digital (codificados por frequência);

- Uma fonte de alimentação composta por duas baterias LR06 (AA), que fornece a energia necessária para os nodos componentes;
- Uma antena dipolo com um alcance exterior de cerca de 100 metros.

Segundo os autores, uma questão importante no *design* de um nodo sensor é a proteção contra as condições ambientais. Assim, os nodos propostos são protegidos por uma caixa de proteção padrão IP65. Além disso, numa primeira concepção, o nó que serve como coordenador da rede é ligado a um PC por meio de um chip conversor de serial-USB.

Para este trabalho, os sensores foram selecionados de modo a serem compatíveis com os requisitos de baixa energia e baixa voltagem. Outra característica importante é o custo financeiro do sensor: nestas aplicações, onde grande número de nós será espalhado em grandes áreas, ser de baixo custo é um pré-requisito.

Para conseguir a detecção precoce de risco de incêndio, alguns parâmetros importantes a serem detectados são a temperatura ambiente, a pressão barométrica, a intensidade da luz (ciclo solar), fumaça, umidade relativa do ar, umidade do solo e temperatura e umidade para a caixa do nó sensor. Os sensores foram selecionados em conformidade com os requisitos de baixa tensão e de baixa potência. Neste trabalho foram incluídos nas portas analógicas dos nodos um sensor de umidade do solo e intensidade da luz (um fotodiodo de silício S8265 de Hamamatsu com alta resistência à umidade). Para monitorar os parâmetros internos da caixa do nodo, foram incluídos sensores analógicos de temperatura (um resistor NTC) e umidade relativa (a resistiva Sencera H25K5A). Além disso, o nó incluiu dois sensores digitais, um sensor de umidade relativa do ar SHT11 Sensirion e um sensor de pressão barométrica MS5540B de Intersema, que incluem a compensação de desvios de temperatura.

Todos estes sensores são adequados para a operação de fornecimento de tensão de 3 V. Para esta aplicação foi acrescentado um sensor de fumaça de baixa potência. Este dispositivo baseia-se na refração da luz do IR devido à presença de fumaça dentro de uma pequena câmara.

O processo de detecção é executado diretamente pelo aparecimento de fumaça, o que permite precisar o local de propagação dos incêndios. As leituras dos demais sensores são utilizadas para gerar alertas quando detectadas condições de risco de incêndio. Estas condições são diferentes em cada estação do ano e dependentes da situação geográfica. Desta forma, o limiar de risco, para este trabalho, deve ser configurado pelo usuário.

A rede é configurada em uma topologia ponto a ponto (que é mais poderosa do que uma topologia em estrela para superfícies extensas), especificamente em uma topologia *mesh*, mostrada na Figura 11. Essa arquitetura faz uso de coordenadores

de sono, que são os dispositivos onde o transceptor foi especificamente programado para permitir a sincronização do período de sono do resto dos nodos. A introdução destes elementos é essencial para a manutenção da rede.

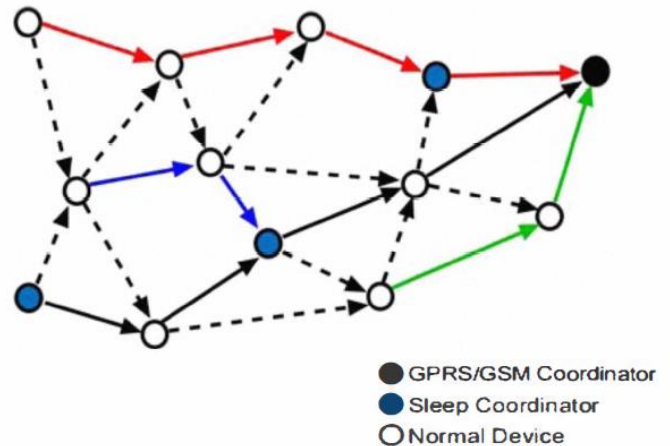


Figura 11 – Topologia de Rede [13].

O consumo de energia em um nó sensor arbitrário tem, em geral, os seguintes componentes, dependendo das operações executadas dentro do nó:

- Detecção de Energia: Este consumo deve ser dissipado, a fim de ativar o circuito de detecção e recolher dados a partir do ambiente. O valor dessa energia depende das especificações dos sensores e consumo do microcontrolador no modo acordado;
- Energia de Comunicações: relacionada com a transmissão e recepção do nó. Transceptor é o dissipador de energia mais importante no nó. A fim de reduzir o consumo de energia devido às tarefas de comunicação, os módulos incluem um *firmware* que procura os caminhos de transmissão de dados com mais economia de energia.

Para chegar a uma longa vida operacional no nodo é necessária uma gestão de energia eficiente. O tempo de vida operacional depende fortemente do momento em que o nodo está transmitindo, ou seja, as vezes em que estiver acordado. Para minimizar o consumo de energia, os sensores são desligados quando o sistema estiver em modo de suspensão utilizando centrais analógicas. Além disso, o microcontrolador é programado usando os diferentes modos disponíveis de redução de energia.

Atualmente, todos os nós sensores possuem duas baterias LR06 1,5 V, enquanto o coordenador o faz a partir de um conector USB. Os autores ainda citam que, em uma próxima fase, painéis solares e baterias recarregáveis irão fornecer energia ao coordenador.

A Figura 12 apresenta o consumo de energia da operação total, assumindo período de 2 s e um ciclo de trabalho de 0,33%

de medição. Dependendo do estado, o sistema apresenta três níveis de consumo de energia diferentes: o primeiro nível corresponde ao sistema em modo de suspensão; neste caso, o consumo permanece abaixo de 108,3 ILW. O segundo nível corresponde ao tempo de medição; neste caso, o microcontrolador, o transceptor e os sensores são ligados, dando um consumo de energia de 165,6 mW para 280 ms. Finalmente, no terceiro nível de energia (159,6 mW), ambos os sensores e microcontrolador estão desligados, mantendo-se no transceptor para completar a transmissão de dados.

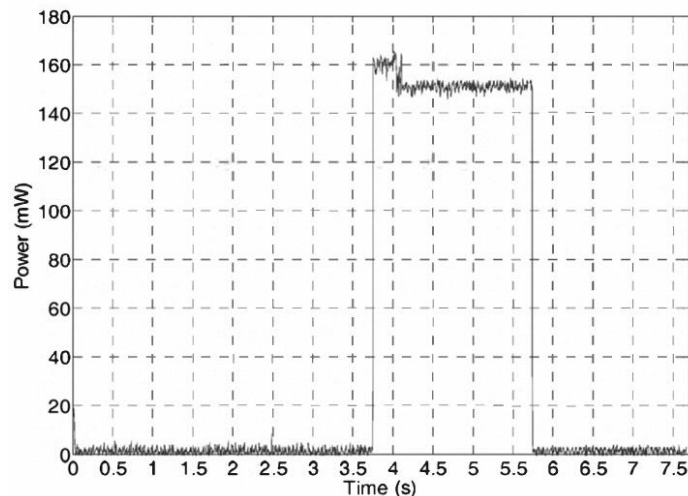


Figura 12 – Consumo de energia do nó com ciclo de trabalho de 0,33% (2 s acordado de 10 min) [13].

5 Análise dos projetos

Nesta seção é apresentado um resumo das técnicas utilizadas para obter maior tempo de uso de uma rede ou menor consumo de energia de nós em RSSF (Redes de Sensores sem Fio), fazendo comparações quantitativas e de interpretação no que diz respeito à otimização de consumo de energia utilizando RSSF no propósito de prevenção e detecção de incêndios florestais.

Com relação ao protocolo de comunicação utilizado, os autores [11], [12] e [13] utilizaram o padrão IEEE 802.15.4 para comunicação entre os nós, protocolo este conhecido como ZigBee. A justificativa da escolha dessa tecnologia, apesar de operar em baixa potência proporcionando um curto alcance, é o baixo custo de implantação e baixo consumo de energia.

Outro quesito a ser tratado, este de caráter temporal, diz respeito ao tempo ou tentativas de requisições entre os nós. Todos os trabalhos relacionados atuam com um *delay* entre uma tentativa e outra. Esta estratégia proporciona uma maior autonomia na vida útil das RSSFs.

Coletivamente os trabalhos permanecem utilizando a estratégia de programar os nós para atuarem em modo *Sleep*, já que isso evita desperdício de energia. Tal desperdício pode ser

inferido no nó remetente quando este tenta enviar dados a um nó destinatário que não está apto a receber informações.

Muito embora não tenhamos encontrado a informação de número de nós utilizados nos testes de [13], pode-se constatar que todos foram testados em simuladores, nenhum em cenário real. Além disso, o número de nós é pequeno, o que de certa forma pode comprometer os resultados, visto que quanto mais nós estiverem transmitindo, maior é o consumo de energia.

Outra constatação refere-se ao fato de que os estudos atuais englobam maiores esforços em soluções baseadas em *software*, minimizando assim o consumo energético.

Tabela 1 - Síntese das funcionalidades dos projetos.

	[11]	[12]	[13]
Protocolo	Zigbee	Zigbee	Zigbee
Delay	Sim	Sim	Sim
Modo Sleep	Sim	Sim	Sim
Número de Nós	16 - 200	8	ND
Testes	Simulador	Simulador	Simulador
Proposta	<i>Software</i>	<i>Software</i>	<i>Software</i>

6 Considerações Finais

Neste trabalho foram tratados aspectos referentes à detecção e prevenção de incêndios com baixo consumo energético utilizando redes de sensores sem fio aplicadas a ambientes florestais. Uma pesquisa foi executada, explorando protocolos de comunicação, *delay* de requisições e tráfego de pacotes, estados de espera de nós, tamanho da rede, tipos de testes realizados para comprovar as experiências (que podem ser simuladas ou aplicadas em ambiente real), e tipo de solução (*software* e/ou *hardware*).

Fica evidenciado que os trabalhos relacionados distinguem-se por ter alto nível de aplicabilidade e por utilizar artefatos de fácil implementação e baixo custo, estimulando assim novas pesquisas que visam otimizar aspectos que dizem respeito ao aprimoramento energético em topologias de RSSFs (Redes de Sensores sem Fio) aplicadas a ambientes florestais.

Através dos estudos apresentados aqui, fica caracterizado que, apesar dos resultados positivos evidenciados, a eficácia do uso de RSSFs na previsão e/ou monitoramento de incêndios em áreas florestais vem se mostrando uma frente de pesquisa em aberto. Dentre os vários aspectos que concorrem para esta situação, está o fato de a revisão de literatura apresentar limitações quanto a exploração de cenários reais, os quais são compostos por uma diversidade de situações cuja previsibilidade e modelagem em simuladores são tópicos de estudo e pesquisa com elevada complexidade.

Como projeto futuro, prevê-se a concepção de cenários de uso no qual se pretende aplicar as técnicas apresentadas neste

estudo concebendo um modelo híbrido, já que todas as técnicas apresentadas apresentaram bons resultados em simuladores, buscando assim medir sua eficácia em cenários reais e com isso contribuir para o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio capaz de auxiliar na predição de risco e monitoramento de incêndios florestais, visando o baixo consumo energético e consequente aumento da vida útil da rede.

**SOLUTIONS FOR REDUCTION OF ENERGY
CONSUMPTION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS
(WSNs) APPLIED TO FOREST ENVIRONMENTS**

ABSTRACT: Wireless sensor networks (WSNs) have been used for applications of monitoring in various scenarios as industrial control, traffic management, public security, home automation, health care and also environmental monitoring. These networks comprise sensors with resources constraints, having energy efficiency as an essential part for its real applicability. In this paper, it is presented the systematization made from the characteristics of three techniques for reduction of energy consumption of wireless sensor networks. The aim of this systematization is to provide input to evaluate RSSF's applicability in risk prediction and forest fires monitoring. It was concluded that the use of RSSF's applied to forest environments still is an open field, especially regarding the durability of the network's lifespan. Although the techniques of reduction of energy consumption proposed in evaluated papers show gains, it is necessary to deepen research to reach a higher length time of batteries and, therefore, make the installation of nodes viable in forests.

Keywords: Wireless sensor network. Energy efficiency. Forest fires monitoring.

Referências

- [1] CEGATTA I. R. *et al.*; Perigo de incêndio florestal: Aplicação da fórmula de monte alegre e avaliação do histórico para Piracicaba, SP. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, v. 42, n. 104, p. 511-522, dez. 2014.
- [2] Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/prevfogo/monitoramento>>. Acesso em: 23/11/2015.
- [3] ALKHATIB, A. A. A.; A review on Forest Fire detection techniques. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2014, p. 1–12, 2014.
- [4] KRSTINIC, D.; Automatic Forest Fire detection in Visible Spectra. 21st Central European Conference on Information and Intelligent Systems, p. 369, 30 abr. 2010.
- [5] R. V. SOARES.; Incêndios florestais – controle e uso do fogo. Fundação de Pesquisa florestal do Paraná, p.213, 1985.

[6] NUNES, J. R. S.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; PROMETHEUS – SISTEMA COMPUTACIONAL INTEGRADO DE CONTROLE DE INCÊNDIOS FLORESTAIS. *FLORESTA*, v. 37, n. 3, 11 dez. 2007.

[7] ASLAN, Y. E.; KORPEOGLU, I.; ULUSOY, Ö.; A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 36, n. 6, p. 614–625, nov. 2012.

[8] FUNG, C. J.; LIU, Y. E.; Lifetime estimation of large IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor networks. 2008 IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computers and Telecommunication Systems, set. 2008.

[9] OTHMAN, M. F.; SHAZALI, K.; Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. *Procedia Engineering*, v. 41, p. 1204–1210, 2012.

[10] F. AKYILDIZ, I. *et al.*; A Survey on Sensor Networks. *Communications Magazine, IEEE*, v. 40, n. 8, p. 102–114, ago. 2002.

[11] SABIT, H.; ANBUKY, A. AL-; GHOLAMHOSSEINI, H.; Wireless sensor network based Wildfire hazard prediction system modeling. *Procedia Computer Science*, v. 5, p. 106–114, 2011.

[12] COSTA, D. G. *et al.*; Um Protocolo Genérico Eficiente de Energia para Aplicações em Redes de Sensores sem Fio sem Restrição de tempo de Resposta. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 5, n. 1, p. 8–15, 5 maio 2015.

[13] BAYO, A.; *et al.*; Early detection and monitoring of forest fire with a wireless sensor network system. *Procedia Engineering*, v. 5, p. 248–251, 2010.

[14] GABBAN, A.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; VIEGAS, D. X. A; comparative analysis of the use of NOAA-AVHRR NDVI and FWI data for forest fire risk assessment. *International Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 19, p. 5677–5687, out. 2008.

[15] ARZEN, K. E. *et al.*; Holistic simulation of mobile robot and sensor network applications using truetype. In *Control Conference (ECC), 2007 European*, p. 4301 – 4308, 2007