

Um Método de Ocupação de Canal por Redes de Sensores sob Interferência WLAN Comparando com Padrões Industriais

Vandenberg B. da Paixão, Renato M. de Moraes

¹Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal do Pernambuco (UFPE)
CEP 50740-560 – Recife – PE – Brasil

vbp2@cin.ufpe.br, renatomdm@cin.ufpe.br

Abstract. *Data exchange in sensor networks under interference from other technologies requires multichannel communication strategies and several methodologies of medium access protocols were adopted seeking better performance. This paper proposes a new method of searching and owning a communication channel, considering the signal-to-noise ratio acting in environments under interference from other wireless local area networks (WLANs), where the channel to be occupied results the lowest level of interference. Comparative results are presented with other technologies that employ channel switching under the use of blacklist, such as ISA100.11a and IEEE802.15e / ATSCHa, where we show that the proposed method obtains the best performance because it ensures that the channel occupied is the best available.*

Resumo. *Trocar dados em redes de sensores sob interferência de outras tecnologias requer estratégias de comunicação multicanal e diversas metodologias de protocolos de acesso ao meio foram adotadas buscando melhor desempenho. Este artigo propõe um novo método de busca e posse de um canal de comunicação, considerando a relação sinal-ruído atuando em ambientes sob interferências de outras redes locais sem fio WLANs (do inglês Wireless Local Area Networks), onde o canal a ser ocupado resulta o menor nível de interferência. São apresentados resultados comparativos com outras tecnologias que empregam troca de canais sob interferência com uso de blacklist, como o ISA100.11a e o IEEE802.15e/ATSCHa, onde mostramos que o método aqui proposto obtém o melhor desempenho, pois garante que o canal ocupado é o melhor disponível.*

1. Introdução

Atualmente e de forma genérica, as redes de sensores implantadas usam um mesmo canal para trocar informações entre os nós. Tal abordagem é uma fonte de ineficiência, uma vez que utiliza mal a banda de frequência sem fio alocada. O desafio é a utilização de todo o espectro de frequência disponível, buscando maximizar a troca de dados e a eficiência energética, e ao mesmo tempo, reduzir problemas típicos, como terminal oculto e exposto, além de evitar perdas de dados induzindo a retransmissão.

Em protocolos MAC (do inglês *Medium Access Control*) multicanais, duas questões precisam ser consideradas: a alocação de canais e a coordenação da comunicação. A solução também deve considerar a eficiência energética e o custo de tempo. Na literatura, um número significativo de protocolos multicanais tem sido proposto para redes de sensores sem fio. Um protocolo multicanal deve se comunicar em

qualquer canal disponível do espectro, no menor tempo, evitando o terminal escondido e com um consumo energético mínimo [Li et al. 2013].

Além das questões citadas, um novo desafio é crescente: a interferência inter-redes causada por outras tecnologias atuantes na mesma faixa espectral, onde *WiFi* e *Bluetooth* são exemplos. Essas tecnologias se sobrepõem às redes de sensores sem fio (RSSF), pois atuam no mesmo espectro de frequências e em geral possuem potência de transmissão comparativamente maior, já que as RSSF precisam hibernar e têm sua potência de transmissão menor, visto que têm como importantes premissas economizar energia e prolongar a vida útil dos sensores [Algora et al. 2017].

Uma solução para mitigar interferências por outras tecnologias nas redes de sensores foi empregar as redes de sensores cognitivas (RSSFC), cujo objetivo básico é buscar canais livres das interferências [Chiwewe et al. 2015]. Mas as redes cognitivas apresentam desvantagens, como a instabilidade no uso do enlace devido ao oportunismo na ocupação do canal, obrigando a desocupação imediata sempre que o usuário primário utilizar o canal.

Porém, detectar interferência provocada por outras tecnologias e decidir migrar para outro canal demanda tempo, processamento e energia, que são fatores relevantes em redes de sensores. Nesse contexto, uma nova linha de pesquisa surgiu buscando mitigar as interferências inter-redes de padrões industriais. Essas tecnologias buscam canais em condições de trocar dados em cenários com interferências.

Na prática existem outras fontes de interferência, como máquinas de solda e fre-sadoras para áreas industriais, assim como fornos micro-ondas e pequenos motores para residências, mas são intermitentes e cujo escopo de modelagem foge ao foco aqui adotado. No caso, aqui será considerado como fonte de interferência o padrão IEEE 802.11 [IEEE.802.11 2007] com dispositivos estáticos e móveis.

O presente artigo propõe um método para alocar canais e evitar interferência inter-redes causada por dispositivos de redes locais sem fio (WLANs) em RSSF. A técnica pode ser aplicada para qualquer interferência externa à rede de sensores, pois o sensor considera o nível de sinal recebido, sem a necessidade de conhecer o padrão concorrente. É também proposta uma metodologia de autoaprendizagem onde analisa o dinamismo de cada canal do espectro, buscando aspectos sazonais de mobilidade, visando decidir pelo bloqueio e inclusão ou não do canal numa lista proibida de uso (*blacklist*) [Son et al. 2004].

O restante deste artigo está dividido da seguinte forma. A Seção 2 expõe a motivação e os trabalhos relacionados ao tópico de interferência inter-redes. A Seção 3 descreve a nova proposta e contribuição, bem como a modelagem empregada. A Seção 4 apresenta os cenários de análise, trazendo os resultados e a discussão. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Mitigar a interferência entre padrões concorrentes é desafiador e, em redes de sensores, a dificuldade se eleva, pois a potência de transmissão é menor em relação às demais tecnologias. Pensando nisso, Ahmed [Ahmed et al. 2010] propôs um protocolo de controle de topologia de múltiplos canais, o *multi-hop* RMMTC para RSSF, no qual considera a interferência causada por redes *WiFi*. Essa abordagem usa vários canais em diferentes

frequências para mitigar a interferência. Nesse sentido, Chiwewe [Chiwewe et al. 2015] disserta sobre interferências nas redes de sensores causadas por padrões concorrentes, aborda conceitos utilizados em rádios cognitivos, tratando as interferências como usuário primário, buscando mudar de canal sempre que esta for detectada. Analisa também ambientes com alto grau de interferências em aplicações industriais.

2.1. Protocolos Multicanais Cognitivos

Nos últimos anos, é crescente a discussão e o desenvolvimento de protocolos MAC cognitivos (MACC) [Han et al. 2015], cujo objetivo principal é utilizar canais ociosos sem causar interferência nos usuários primários daqueles canais [Sun et al. 2013]. Os protocolos MACC buscam canais em condições de uso, em seguida os sensores iniciam o sincronismo e a troca de dados. O processo se repete sempre que o nível de interferência não permite a comunicação nos padrões pré-estabelecidos ou desejados [Zareei et al. 2017]. Mas os protocolos MACCs não têm em suas premissas verificar se quem ocupa o canal é de fato o usuário primário ou outra interferência.

2.2. Padrões Industriais em Redes de Sensores sem Fio

Com a crescente utilização da mesma faixa espectral por várias tecnologias concorrentes, surgiu um segmento que busca mitigar as interferências: as tecnologias industriais sem fio. A Figura 1 resume essas tecnologias as quais procuram viabilizar a troca de dados em ambientes com interferências externas à rede e empregam metodologias de autoaprendizagem, onde as características apresentadas no ambiente são catalogadas e seus dados analisados para a tomada de decisão [Ivanovitch Silva et al. 2013].

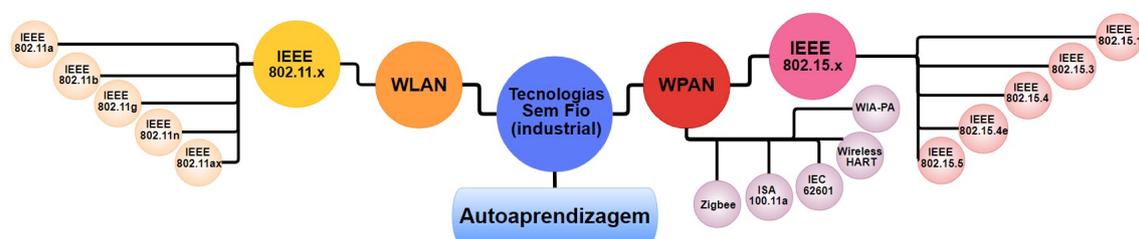


Figura 1. Classificação das tecnologias industriais sem fio. Adaptado de [Ivanovitch Silva et al. 2013].

2.2.1. Padrão IEEE 802.15.4e

A emenda IEEE 802.15.4e lançada em 2012 também intencionou tornar o padrão adequado para mais áreas de aplicação, tais como industriais e comerciais. A fim de manter a compatibilidade com os dispositivos atuais foram propostas apenas modificações na camada de enlace. Três novos modos operacionais são definidos nesta alteração: Redes Determinísticas de Baixa Latência (*Low latency deterministic network* (LLDN)), Extensão Determinística e Síncrona com Múltiplos Canais (*Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension* (DSME)) e Segmentação no Tempo com Salto entre Canais (*Timeslotted channel hopping* (TSCH)) [De Guglielmo et al. 2016]. O *Adaptive Time Slotted Channel Hopping* (A-TSCH) [Tavakoli et al. 2015] estende o modo TSCH do IEEE 802.15.4e para alterar a lista de canais que são utilizados de acordo com a qualidade dos canais, gerando uma lista negra (*blacklist*) registrando os canais excluídos do salto da sequência. Este trabalho mostrou melhorias que variam de 5,3% a 8,1% na taxa de

entrega de pacotes, mas a *blacklist* é sempre crescente, e uma vez bloqueado o canal é excluído de novas avaliações. Em cenários que apresente mobilidade, os canais podem apresentar sazonalidade de interferência, o que não é considerado.

2.2.2. WirelessHART (IEC 62591)

O protocolo de comunicação HART® (*Highway Addressable Remote Transducer*) é um padrão da indústria para comunicação de instrumentos de campo inteligentes microprocessados e baseado nele, o WirelessHART especifica em sua camada física que o meio está ocupado se receber algum sinal cuja técnica de modulação e espalhamento espectral é compatível com o IEEE 802.15.4. No caso não importa a energia do sinal recebido, é apenas necessário apresentar algumas propriedades para identificar que o canal está ocupado. Com o objetivo de minimizar a influência de interferências na rede e permitir a coexistência com outros padrões (IEEE 802.11, Bluetooth, etc.), foi adicionado um mecanismo de saltos de frequência. Cada transmissão na rede utiliza uma frequência diferente (canal), diminuindo assim a probabilidade de escolher um canal ruidoso e/ou interferente.

A camada física da especificação WirelessHART é baseada no padrão IEEE 802.15.4. O canal 26 não é utilizado na especificação WirelessHART por questões regulatórias de alguns países [Ivanovitch Silva et al. 2013], [Bertelli 2017], [Nobre 2015]. Esse padrão apresenta deficiências, pois não busca isolar o canal com elevada interferência, provocando desperdício de energia e de tempo. Em cenários com mobilidade a *blacklist* não é eficiente, pois é criada manualmente pelo administrador.

2.2.3. ISA100.11a (IEC 62734)

A Sociedade Internacional de Automação (ISA) aprovou em 2009 um novo padrão de comunicação sem fio voltado para aplicações industriais de monitoramento e controle. Esse padrão foi nomeado ISA100.11a e apresenta suporte a coexistência de outras tecnologias de comunicação sem fio em um mesmo ambiente, como por exemplo: telefonia celular, IEEE 802.11x, IEEE 802.15x, IEEE 802.16x. Similar ao padrão WirelessHART, a camada física do padrão ISA100.11a é baseada no IEEE 802.15.4, entretanto, o ISA100.11a adiciona algumas peculiaridades, permitindo a utilização de 16 canais (11-26) onde o canal 26 pode ser opcional [Bertelli 2017], [Ivanovitch Silva et al. 2013]. Esse padrão permite *blacklist*, e quando ativa, caso um canal não apresente condições de uso, ele é bloqueado, mas não é eficiente em cenários com mobilidade onde os canais têm interferência variável, e uma *blacklist* dinâmica não é suportado pelo padrão.

2.3. Taxonomia dos Algoritmos de Escalonamento de Salto de Canal

De forma genérica, os algoritmos de escalonamento de salto de canal estão divididos em dois grupos. O primeiro depende de um controlador central PCE (Path Computation Element). No segundo os algoritmos são executados pelo próprio nó. Essas duas famílias dependem de abordagens muito diferentes e são adaptadas para distintos cenários. As abordagens baseadas em PCE são adequadas para topologias estáveis, onde o controlador central pode ter uma visão precisa das características de tráfego e canal. Inversamente, as soluções distribuídas tendem a ser mais robustas às mudanças sem fazer nenhuma suposição a priori nem na topologia, nem no volume de tráfego a ser transmitido [Hermeto et al. 2017]. A Figura 2 apresenta uma taxonomia de escalonamento de salto de

canal em diversos cenários. O presente trabalho propõe uma abordagem descentralizada, pois busca ser empregado em qualquer cenário.

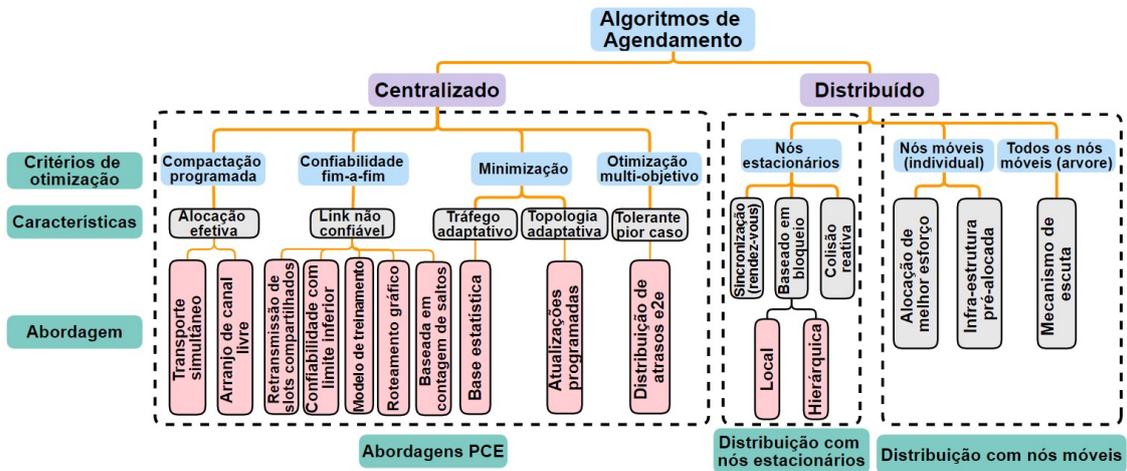


Figura 2. Taxonomia de algoritmos de escalonamento de salto de canal. Adaptado de [Hermeto et al. 2017].

3. Nova Proposta e Modelagem

Nas abordagens clássicas de protocolos MAC multicanais, trocar dados em um ambiente com elevado nível de interferência requer uma mudança de canal sempre que não seja possível a comunicação. Porém, não existe garantia que o próximo canal a ser ocupado possua condições de uso. Também não garante que é o melhor canal do espectro. A Figura 3(a) mostra o fluxograma de uma troca sequencial clássica de canais. Já a Figura 3(b) apresenta a nova abordagem aqui proposta, onde garante que o próximo canal apresente as melhores condições de uso do espectro.

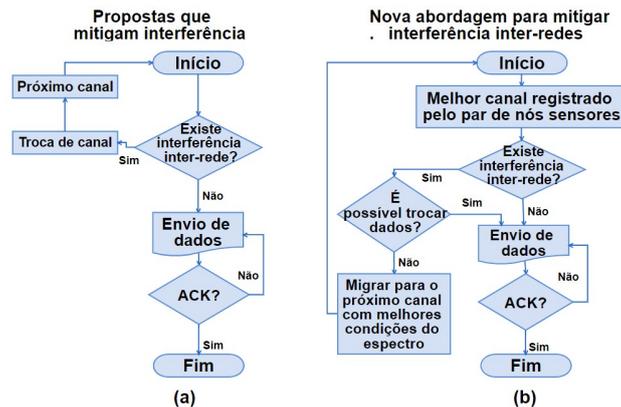


Figura 3. Fluxograma de protocolos que mitigam interferência inter-redes: (a) abordagem sequencial clássica de canais; (b) nova abordagem de busca dos melhores canais.

Portanto, o presente artigo busca contribuir com uma proposta de ocupação eficiente de canal e mitigação de interferência em três diferentes etapas. No contexto de qual canal com menos interferência ocupar, o artigo descreve uma metodologia que emprega o canal com melhor relação sinal-ruído e interferência (SNIR, do inglês *signal-to-noise and interference ratio*) em todo o espectro. Note que uma outra possibilidade poderia ser o uso do LQI (do inglês *Link Quality Indicator*).

Em uma segunda etapa, de posse de todas as informações de ocupação de cada canal, o par de nós sensores que desejam comunicar-se compartilham seus mapas espectrais, e estes geram um mapa comum ao par, obtendo uma escala decrescente de preferência de canais a serem ocupados no enlace. Isso pode ocorrer como parte do protocolo de acesso ao meio, por exemplo, trocando pacotes de controle.

Por fim, de posse do mapa comum ao par, os nós sensores avaliam as possibilidades de ocupação, escolhem o canal com menor interferência (ou melhor SNIR), buscam o sincronismo e a troca de dados.

Uma vez que os nós estejam ocupando o melhor canal selecionado para comunicação, caso outra interferência aconteça que piore a SNIR e portanto aumente a taxa de erros, por exemplo, depreciando ou até interrompendo o enlace, o par de nós sensores buscará o canal subsequente da lista armazenada, no caso, o segundo melhor canal em condições de uso. O processo se repete até que não haja mais canais em condições de uso e neste caso o par de nós sensores refaz todo o processo de varredura de canais para obter novo mapa.

Para efeito de análise, deve-se também considerar o atraso no tempo que o nó sensor leva para mudar para o próximo canal, constatar que o canal está disponível e iniciar a comunicação. Nesse contexto, denominamos esse tempo como \mathcal{T} . Note que outra fonte de atrasos na conexão pode ser consequência da má escolha por um canal com alta interferência, que a princípio viável, pode gerar erros nos dados recebidos.

3.1. Modelagem de Avaliação

Este trabalho também compara a nova proposta com os padrões IEEE 811.15.4e/A-TSCH (com algoritmo *blacklist*), WirelessHART (com e sem *blacklist* manual) e ISA100.11a (com e sem o canal 26 ativo), e também com a troca sequencial de canais. Para tanto, a nova metodologia assume as mesmas configurações de tempo para troca de canal e nível de interferência dessas tecnologias, onde o tempo para mudar de canal é $\mathcal{T}=100\text{ms}$.

Aqui, como exemplo de modelagem, consideraremos a interferência causada por uma fonte WLAN IEEE 802.11b (*WiFi*) sobre o padrão IEEE 802.15.4 empregado pelo nó sensor, em que cada estação ou nó transmite com potência estabelecida em seu respectivo padrão. O procedimento pode ser estendido para outras tecnologias sem fio. Para modelar o nível de interferência causada por um sinal WLAN em um nó sensor, os seguintes fatores devem ser considerados: potência do transmissor/interferente WLAN, frequência do canal e potência de transmissão do nó sensor. Observando que um canal WLAN *WiFi* de um nó interferente ocupa aproximadamente a mesma faixa espectral que quatro canais IEEE 802.15.4 empregado pelos nós sensores, mitigar essa interferência requer uma análise dessa ocupação. Da Figura 4, é possível constatar que a máscara do espectro da transmissão WLAN interfere de forma plena em dois canais IEEE 802.15.4 e com menos intensidade em canais adjacentes.

Por outro lado, a fórmula de Friis descreve como a potência de um sinal é recebido a partir de um nó transmissor situado a uma distância d para o espaço livre, sendo dada por [Rappaport 2002]

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r, \quad (1)$$

onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena de transmissão, G_r é o ganho da antena receptora, e λ é o comprimento de onda do sinal

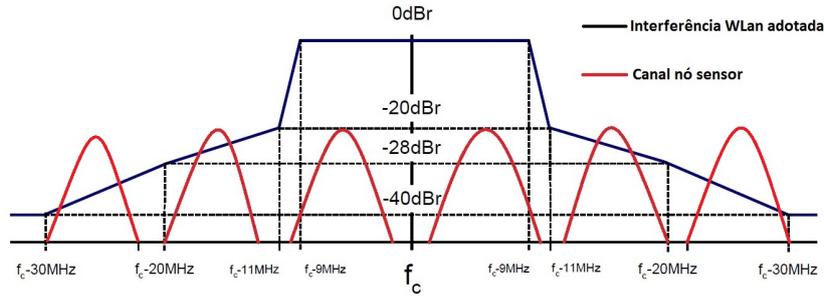


Figura 4. Máscaras espectrais de um canal WLAN (*WiFi*) e canais IEEE 802.15.4 comparados. Adaptado de [IEEE.802.15.4 2015] e [IEEE.802.11 2007].

que é igual a razão c/f em que c é a velocidade de propagação da luz e f é a frequência do sinal. É possível observar que a frequência influencia a potência recebida, assim cada canal obtém resultado distinto. Dessa forma, modelamos como cada nó pode medir o nível de sinal de transmissores vizinhos.

Cada canal WLAN ocupa uma posição distinta no espectro, por consequência interfere de forma atenuada à medida que se distância no espectro da frequência do canal do nó sensor. A Figura 5 apresenta a faixa espectral de ocupação de canais WLANs interferentes com um canal IEEE 802.15.4.

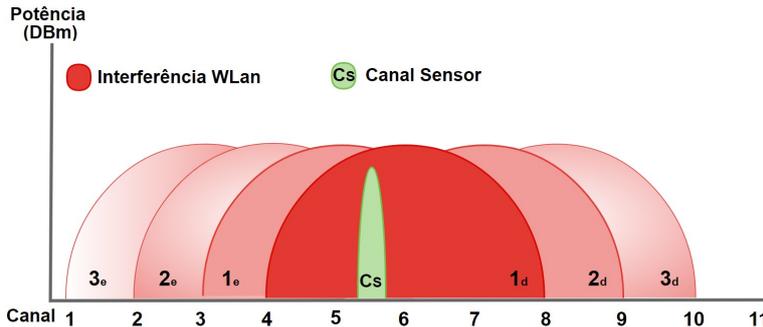


Figura 5. Exemplo de interferências de vários canais WLAN *WiFi* em um canal sensor IEEE 802.15.4 aqui designado de Cs. O canal 1e (no caso canal 5) significa primeiro canal WLAN interferente situado à esquerda do canal Cs IEEE 802.15.4, 2e (no caso canal 4) é o segundo canal WLAN à esquerda, etc. e 1d (no caso o canal 6) indica o primeiro canal WLAN interferente à direita de Cs, e assim sucessivamente.

Seja P_{iE} , para $i = 1, 2, 3$, a potência transmitida por um nó interferente WLAN num dos três canais à esquerda do canal usado pelo nó sensor, então designaremos P_{iCe} como a correspondente potência recebida no canal sensor. Desta forma, da Figura 4, têm-se que $P_{1Ce} = P_{1e}$, $P_{2Ce} = -20dBr(P_{2e})$, $P_{3Ce} = -28dBr(P_{3e})$ e analogamente para os canais à direita $P_{1Cd} = P_{1d}$, $P_{2Cd} = -20dBr(P_{2d})$, $P_{3Cd} = -28dBr(P_{3d})$.

3.1.1. Interferências Estática e Móvel

A interferência é composta por componentes oriundas de dispositivos estáticos (como os pontos de acesso WLAN) e dispositivos móveis (como telefones celulares). Na análise aqui considerada os pontos de acesso WLAN e os sensores serão considerados estáticos, ou seja, fixos não possuindo mobilidade. Já os dispositivos móveis proporcionam interferência variável. A Figura 6 descreve no espectro de frequências as interferências estática

e dinâmica, em que é possível observar a variação mínima (cor azul do espectro) quando, por exemplo, apenas há um ponto de acesso WLAN presente no canal e máxima quando se acrescentam dispositivos móveis neste mesmo canal (cor vermelho do espectro). Assim a interferência mínima aqui considerada corresponde à interferência estática quando não há dispositivos móveis. Já a interferência máxima considera os dispositivos móveis ocupando o mesmo canal WLAN considerado.

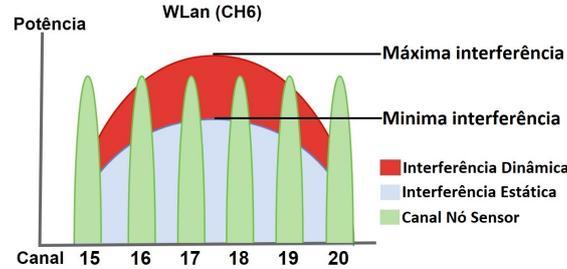


Figura 6. Exemplo de interferências mínima e máxima.

A SNIR de um nó sensor é a potência recebida (P_r) do outro nó sensor comunicante dividida pela soma das potências recebidas interferentes estática ($P_{Estática}$ oriunda dos pontos de acesso WLAN) e dinâmica ($P_{Dinâmica}$ oriunda dos dispositivos móveis), considerando o valor do ruído (N_0) no canal desprezível, isto é $N_0 = 0$. Assim,

$$SNIR = \frac{P_r}{N_0 + P_{Estática} + P_{Dinâmica}} = \frac{P_r}{P_{Estática} + P_{Dinâmica}}, \quad (2)$$

em que $P_{Estática} = P_{F1} + P_{F2} + P_{F3} + \dots + P_{Fn}$, sendo P_{Fi} a potência recebida do i -ésimo dispositivo fixo (ponto de acesso ou roteador) WLAN.

Já a interferência móvel (ou dinâmica) varia de um valor nulo (quando não há dispositivos móveis presentes) a um valor máximo em função da quantidade de usuários móveis presentes. Assim, considerando m dispositivos móveis presentes localizados a uma distância mínima do nó sensor (aqui adotada como sendo 1 metro) resulta que

$$0 \leq P_{Dinâmica} \leq \sum_{i=1}^m P_{Di}, \quad (3)$$

em que P_{Di} é a potência recebida do i -ésimo dispositivo móvel considerado localizado a uma distância mínima de 1 metro do nó sensor.

3.1.2. Identificando as Interferências Estática e Dinâmica

As interferências estática e dinâmica atuam no mesmo ambiente, mas a interferência dinâmica pode variar até um nível nulo, resultando apenas interferência estática (ver Eqs. (2) e (3)), possibilitando (ou não) a comunicação no canal. A metodologia aqui proposta busca identificar e separar essas interferências.

Consideramos que um nó sensor efetua leituras periódicas do valor de SNIR no canal, sendo cada leitura denominada de δ_i . Assim, ao analisar o canal pela primeira vez obtém-se um nível δ_1 . No próximo período faz nova leitura e obtém δ_2 . Caso $\delta_1 < \delta_2$, a diferença poderia indicar a presença de usuários móveis interferentes, onde o valor maior de SNIR indicaria que os dispositivos móveis se distanciaram do nó sensor. Ao descartar o valor menor de δ_i a cada ciclo de leitura, a tendência é o sensor chegar ao nível máximo de SNIR, onde a interferência é devido apenas aos dispositivos estáticos. Assim, o objetivo é gerar uma *blacklist* cujos canais apresentem melhores condições de uso, observando as sazonalidades provocadas pela mobilidade.

3.1.3. Autoaprendizagem na Análise e Controle da *Blacklist* Dinâmica Proposta

Devido à dinâmica resultante da mobilidade, um canal pode variar suas condições de uso, forçando ao monitoramento, mas isso demanda tempo e desperdício energético. Fatores diversos podem influenciar no dinamismo da interferência. Mobilidade, mudança de canal dos dispositivos móveis interferentes, horários de maior ou menor uso do canal e nível de interferência mínimo (apenas interferência de dispositivos estáticos) são fatores determinantes na decisão de uso do canal. A solução é uma análise do canal, buscando identificar interferências de usuários móveis e a viabilidade do seu uso. A proposta aqui compara o nível de interferência atual com a observada na medida anterior, onde a mobilidade é identificada através da variação de interferência em comparação com um limiar ajustável, fator determinante para inclusão ou exclusão da *blacklist*.

4. Simulação Numérica e Resultados

Simulações numéricas foram realizadas através do MATLAB usando a proposta e o modelo apresentados, onde se adotou o cenário da Figura 7 com os parâmetros da Tabela 1, em que o cálculo das potências recebidas foi obtido do modelo de Friis (Eq. (1)).

Tabela 1. Potências de Transmissão (P_t) e ganhos das antenas (G_t, G_r) [Cisco-Inc. 2017], [IEEE.802.15.4 2015], [IEEE.802.11 2007].

Parâmetro	Sensor	Roteador WLAN	Dispositivo Móvel
P_t (mW)	50	100	40
$G_t = G_r$ (dBi)	1	5	3

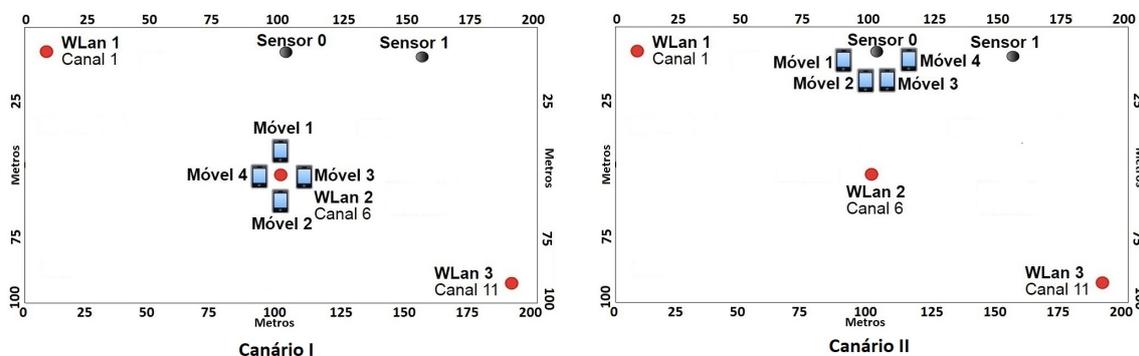


Figura 7. Cenários de Avaliação (escalas de distância em metros).

Os cenários na Figura 7 ilustram três pontos de acesso (ou roteadores) interferentes na tecnologia *WiFi* designados de WLAN1, WLAN2 e WLAN3 operando nos canais 1, 6 e 11, respectivamente, do padrão IEEE 802.11b, posicionados com distâncias distintas para dois nós sensores comunicantes, designados de Sensor0 e Sensor1, e é usado para uma primeira etapa de análise. Numa segunda etapa, os dispositivos móveis são considerados com $m = 4$, isto é, há quatro dispositivos móveis (Móvel1 a Móvel4). Para efeitos de análise, o emprego de dispositivos móveis resulta em dois níveis extremos de interferência. Ou seja, mínima interferência quando nenhum dispositivo móvel está presente e resulta apenas a interferência estática, e máxima interferência, quando todos os dispositivos móveis estão presentes (ver Eqs. (2) e (3)) e operando no canal 6.

No Cenário I os dispositivos móveis são posicionados a uma distância mínima de 1 metro do WLAN2 e estão conectados através do canal 6. No Cenário II os dispositivos móveis estão à distância mínima de 1 metro do Sensor0.

Assim, a avaliação de desempenho foi dividida em duas etapas. Na primeira (Cenário I da Figura 7), os dispositivos estáticos estão ativos, em seguida foram adicionados os dispositivos móveis, resultando na sobreposição de interferências. É apresentado o resultado comparativo do conjunto de padrões industriais, comparando com a metodologia apresentada, cujo objetivo dessa sobreposição é demonstrar a variação de interferência mínima e máxima, onde na mínima os dispositivos móveis estão distantes ou desativados e na máxima estão a uma distância mínima do nó sensor.

Assim, na segunda etapa (Cenário II da Figura 7), o conjunto de dispositivos móveis se posicionam a uma distância mínima do sensor, avaliando e comparando a evolução e autoaprendizagem dos algoritmos *blacklist* A-TSCH e ISA 100.11a com a metodologia apresentada.

Os mesmos cenários foram considerados para os padrões IEEE 802.15.4, o IEEE 811.15.4e/A-TSCH com algoritmo *blacklist*, e o WirelessHART com e sem *blacklist* (configuração manual) e ISA100.11a (com e sem o canal 26 ativo), para efeitos de comparação com e sem dispositivos móveis.

4.1. Análise da SNIR no Cenário I

A Figura 8 ilustra a SNIR resultante em cada nó sensor no Cenário I em que além dos pontos de acesso estarem transmitindo, também consideramos que os terminais móveis transmitem, de forma a empregar o pior dos casos neste cenário com interferência.

Aqui, como exemplo, considera-se $SNIR > 5$ dB para a comunicação ser viável, mas isso pode depender do fabricante da tecnologia empregada.

As Figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, o mapa de SNIR de busca sequencial e o mapa de SNIR decrescente compartilhado, onde se observa que apenas os canais 26 e 25 resultam SNIR acima de 5dB e portanto são viáveis para uso, nessa respectiva ordem do melhor para o pior canal.

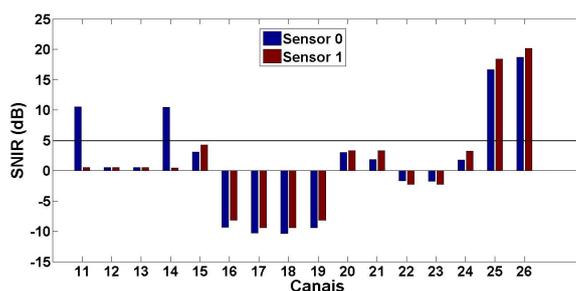


Figura 8. SNIR resultante em cada nó sensor para o cenário com dispositivos móveis - Cenário I.

4.2. Atraso

No caso, na metodologia sequencial de busca (ver Figura 9), o par sensor leva $14 \mathcal{T}$ para encontrar o primeiro canal em condições de uso o qual possui o menor nível de sinal dentre os dois aceitáveis. Na metodologia aqui proposta (ver Figura 10) leva-se $16 \mathcal{T}$, porém resultando o melhor canal para uso.

4.3. Comparando com Padrões no Cenário I com Dispositivos Móveis

A Figura 11 compara os padrões WirelessHART com e sem *blacklist* ativa, o ISA100.11a com e sem canal 26 ativo, e o padrão 802.15.4e/A-TSCH (com *blacklist*), além da nova

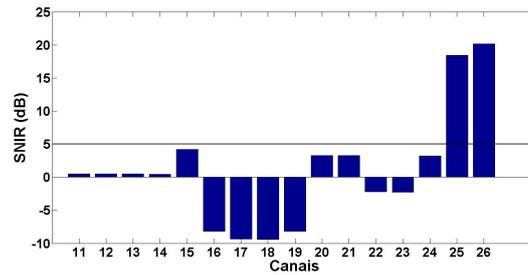


Figura 9. Mapa espectral comum com dispositivos móveis (ordenação sequencial) - Cenário I.

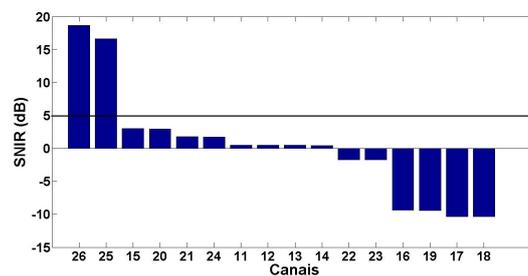


Figura 10. Mapa espectral comum com dispositivos móveis (ordenação decrescente da SNIR) - Cenário I.

metodologia proposta. Verifica-se que os ciclos de busca resultantes (ciclos A e B) para o WirelessHART sem *blacklist* e ISA100.11a sem canal 26 possuem o piores resultados em termos de atraso na busca por novo canal, pois por ter um canal a menos, no instante de haver interferência, os dois padrões dispõem de apenas um canal em condições de uso, obrigando a uma varredura completa do espectro.

Quando adicionado o canal 26 ao padrão ISA100.11a, resulta em apenas dois canais em condições de uso, obtendo o segundo pior resultado em termos de tempo de busca (ciclo C) quando surge interferência. Ao adicionar de forma manual a *blacklist* no padrão WirelessHART, devido a disponibilidade de apenas um canal no cenário aqui considerado (ciclo D), o par de nós sensores passa a operar em modo mono-canal, e devido a implementação manual da *blacklist*, caso esse canal sofra interferência a comunicação torna-se inviável, pois todos os outros canais estão bloqueados.

Observando o resultado do padrão 802.15.4e/A-TSCH, onde o algoritmo *blacklist* atua sempre que o canal apresenta interferência, impossibilitando a comunicação, é possível constatar que possui o melhor resultado em termos de atraso no ciclo de busca (ciclo E), pois apenas os canais em condições de uso estão ativados. Porém, devido a mobilidade e dinamismo, caso algum canal na *blacklist* volte a apresentar condições de uso, este não poderá ser usado novamente devido ao banimento, o que é uma limitação.

Por fim, o resultado da nova proposta, que com a presença dos dispositivos móveis leva ao canal 20 não estar mais disponível. Porém, caso a mobilidade no cenário volte a tornar este canal utilizável, o ciclo F mostra que eventualmente a busca o encontrará tornando-o possível de uso, o que é uma vantagem em relação ao padrão 802.15.4e/A-TSCH que bane o canal para sempre uma vez que está na *blacklist*.

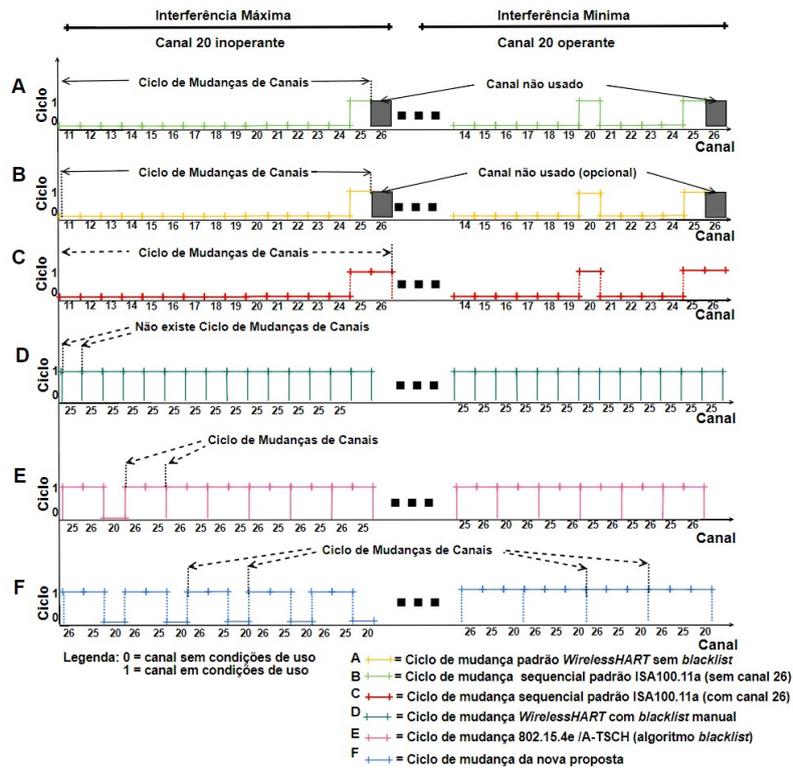


Figura 11. Ciclo de mudança de canais no cenário com dispositivos móveis. Num primeiro momento os dispositivos móveis estão presentes resultando máxima interferência e depois os dispositivos móveis são retirados para verificar a adaptação das abordagens a alteração no Cenário I.

4.4. Comparando os Algoritmos *Blacklist* com a Proposta no Cenário II

Com objetivo de analisar o comportamento dos Algoritmos *Blacklist* A-TSCH e ISA 100.11a, além da metodologia apresentada, uma nova comparação foi realizada. Com todos os dispositivos ativos, conforme o Cenário II exposto na Figura 7, seguiu-se às seqüências de passos: 1 - Os dispositivos estáticos permanecem com suas configurações inalteradas; 2 - Todos os dispositivos móveis foram posicionando a uma distância mínima de 1 metro do sensor; 3 - Os dispositivos móveis foram concentrados em um mesmo canal e seguem uma seqüência de ciclos de saltos de canais, somando as interferências dos pontos de acesso, onde cada canal tem uma interferência máxima.¹

A Figura 12 ilustra as interferências máximas e sazonais atuantes sobre os sensores. É possível constatar que os algoritmos *blacklist* A-TSCH e ISA 100.11a ao detectar interferência bloqueia o canal, adicionando a sua *blacklist*, ou seja, a lista de canais bloqueados é sempre crescente, resultando apenas dois canais operantes. Já a metodologia aqui proposta, identificou as interferências estáticas e dinâmicas (mínimas e máximas), definindo o número de canais ativos, onde os canais bloqueados são apenas os que não apresentam condições de uso com as interferências mínimas (estáticas). Os demais canais não serão bloqueados, mesmo que apresentem ao longo do tempo interferências sazonais, pois foi identificado a mobilidade e existem canais reservas em caso de mudança de canal, isto é, seguindo a ordem decrescente de qualidade dos canais, o melhor canal é o 26, decrescendo até o canal 11. Nesse cenário, o par sensor se comunica no canal 26 e

¹A análise da SNIR para o Cenário II foi omitida devido a falta de espaço.

possui três canais reservas disponíveis e operantes (25, 20 e 15). O processo se repete nas sequências seguintes.

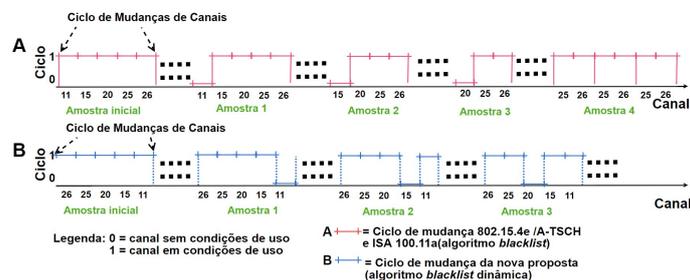


Figura 12. Amostras blacklist: A) Algoritmos A-TSCH e ISA 100.11a. B) Nova abordagem com dispositivos móveis identificados no Cenário II.

5. Conclusão

O presente trabalho apresenta uma nova abordagem de ocupação do espectro para redes de sensores, considerando o espectro do padrão IEEE 802.15.4, quando seus canais estão sujeitos à interferências de outras tecnologias, como o padrão IEEE 802.11b. A abordagem procura compartilhar entre os pares de nós sensores uma visão comum do espectro e determina uma ordem de ocupação do canal com menor nível de interferência para o de maior nível de interferência. Foram realizadas simulações numéricas em um cenário com pontos de acesso e considerando a presença de usuários móveis, verificado que o novo método de ocupação proposto, por buscar classificar por ordem de menor interferência dos canais, é eficaz no uso do espectro em relação às abordagens convencionais e dos padrões IEEE 811.15.4e/A-TSCH (com algoritmo *blacklist*), WirelessHART (com e sem *blacklist* manual) e ISA100.11a (com e sem o canal 26 ativado) que empregam uma ocupação sequencial sem classificação em relação ao nível de interferência no cenário investigado.

Por fim, foi comparado através de simulação numérica os algoritmos ISA100.11a e IEEE 811.15.4e/A-TSCH, com a metodologia aqui proposta, observando o efeito de interferências sazonais em cada canal, constatando que nos algoritmos a *blacklist* é crescente sempre que verifica interferência, bloqueando o canal. Já na metodologia aqui proposta foi identificado a interferência dinâmica (sazonal), mantendo os canais ativos.

Como trabalhos futuros, pretende-se testar a proposta noutros cenários mais complexos e com simuladores de redes, e também integrar o método em um protocolo real de acesso ao meio para experimentos em dispositivos práticos.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado em parte pela FACEPE e pelo IF Sertão-PE em Petrolina.

Referências

- Ahmed, N., Salil, S. K., and Jha, S. (2010). Mitigating the effect of interference in wireless sensor networks. In *IEEE Local Computer Network Conference, Denver, CO, EUA*, pages 160–167.
- Algora, C. M. G., Reguera, V. A., Deligiannis, N., and Steenhaut, K. (2017). Review and classification of multichannel mac protocols for low-power and lossy networks. *IEEE Access*, 5:19536–19561.

- Bertelli, G. P. M. (2017). Controle sobre redes industriais sem fio: uma avaliação de desempenho dos padrões wirelesshart e isa100. 11a. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, Dissertação de mestrado.
- Chiwewe, T. M., Mbuya, C. F., and Hancke, G. P. (2015). Using cognitive radio for interference-resistant industrial wireless sensor networks: An overview. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(6):1466–1481.
- Cisco-Inc. (2017). Lan design guide for high-density client environments in higher education. *Cisco Documentation*.
- De Guglielmo, D., Brienza, S., and Anastasi, G. (2016). Ieee 802.15. 4e: A survey. *Computer Communications*, 88:1–24.
- Han, W., Huang, C., Li, J., Li, Z., and Cui, S. (2015). Correlation-based spectrum sensing with oversampling in cognitive radio. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 33(5):788–802.
- Hermeto, R. T., Gallais, A., and Theoleyre, F. (2017). Scheduling for ieee802. 15.4-tsch and slow channel hopping mac in low power industrial wireless networks: A survey. *Computer Communications*, 114:84-105.
- IEEE.802.11 (2007). Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications.
- IEEE.802.15.4 (2015). IEEE std 802.15.4-2015 (revision of IEEE std 802.15.4-2011) - ieee standard for low-rate wireless networks.
- Ivanovitch Silva, D. L., Duarte, A., Guedes, L. A., Aquino, L., and Saito, K. (2013). Tecnologias emergentes para redes industriais sem fio: Wirelesshart vs isa100.11a. In *VII Congresso Rio Automação, Rio de Janeiro, RJ, Brazil*, pages 1–10.
- Li, M., Li, Z., and Vasilakos, A. V. (2013). A survey on topology control in wireless sensor networks: Taxonomy, comparative study, and open issues. *Proceedings of the IEEE*, 101(12):2538–2557.
- Nobre, M. H. R. (2015). Contribuições em escalonamento e análise de desempenho de redes wirelesshart. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, Tese de Doutorado.
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prent. Hall.
- Son, D., Krishnamachari, B., and Heidemann, J. (2004). Experimental study of the effects of transmission power control and blacklisting in wireless sensor networks. In *IEEE SECON, Santa Clara, CA, EUA*, pages 289–298.
- Sun, H., Nallanathan, A., Wang, C.-X., and Chen, Y. (2013). Wideband spectrum sensing for cognitive radio networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 20(2):74–81.
- Tavakoli, R., Nabi, M., Basten, T., and Goossens, K. (2015). Enhanced time-slotted channel hopping in wsns using non-intrusive channel-quality estimation. In *IEEE MASS, Dallas, TX, USA*, pages 217–225.
- Zareei, M., Islam, A., Baharun, S., Vargas-Rosales, C., Azpilicueta, L., and Mansoor, N. (2017). Medium access control protocols for cognitive radio ad hoc networks: A survey. *Sensors*, 17(9):21–36.