

Uma Técnica Cognitiva Com Histórico e Janela Deslizante para Adaptação de Parâmetros em Redes LoRa

Ronaldo Modesto¹, Lucas Figueiredo¹, Edelberto Franco Silva¹

¹Depto. de Ciência da Computação – Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

{ronaldomodesto, edelberto}@ice.ufjf.br

lucas.figueiredo@engenharia.ufjf.br

Abstract. *Sub-GHz communications technologies have been arisen to provide long range coverage at low complexity and costs. Amongst the existing solutions, the LoRa® has been considered as one of the most promising ones. Its main application is to allow ubiquitous connectivity to outdoor IoT. However, it must be considered factors that directly influences these type of communication, such as frequency, spreading factor, bandwidth and coding rate. In this paper, we have considered LoRa's physical layer characteristics with an observation history of SNR through a sliding window to automatically change of configuration. The obtained results from a real scenario shows that the sliding window technique presented, on its best configuration, a relative reduction of 16,26% on average on frequency changing number and a relative increase of 36,73% on average on SNR gain to that same configuration, when compared to the windowless technique.*

Resumo. *Tecnologias de comunicação em redes sub-GHz têm surgido para fornecer uma cobertura a longo alcance a um custo e complexidade baixos. Dentre as soluções existentes, a LoRa® tem sido uma das mais promissoras. Sua principal aplicação é permitir conectividade ubíqua para a IoT outdoor. Porém, deve-se levar em consideração fatores que influenciam diretamente esse tipo de comunicação, como frequência, espalhamento espectral, largura de banda, e a taxa de codificação. Neste trabalho foram consideradas características da camada física LoRa com um histórico de observações da SNR por janela deslizante para a troca automática de configuração. Os resultados obtidos em um cenário real mostram que a técnica de janela deslizante apresentou, na melhor configuração, uma redução média relativa de 16,26% no número de trocas com um aumento médio relativo de 36,73% no ganho de SNR para esta mesma configuração, quando comparado com a técnica sem janela.*

1. Introdução

Com os recentes avanços nas redes de computadores, tecnologias de comunicação de longo alcance, como LPWAN (*Low-Power Wide-Area Networks*) e *Sub-GHz*, têm chamado atenção de pesquisadores e empresas ao redor do mundo. Tais tecnologias servem de subsídio para alguns nichos do conceito de IoT (*Internet das Coisas - Internet of Things*), como em aplicações para *Smart Cities* [Centenaro et al. 2016], *Smart Farms* [Codeluppi et al. 2020, O Sales et al. 2020], *Long-Range Machine-to-Machine*

(LRM2M) [Wang and Fapojuwo 2017], dentre várias outras. Neste contexto, a tecnologia LoRa (*Long Range*) vem ganhando bastante destaque, devido à sua robustez e baixo consumo de energia, sem abrir mão do alcance e cobertura do seu sinal.

À medida que a adoção de uma tecnologia de comunicação sob determinado espectro de frequência aumenta, cresce também a disputa pelo meio, a intensidades das interferências e, conseqüentemente, diminui a garantia de sucesso na troca dos pacotes e datagramas. Assim, surge a necessidade de utilizar o espectro de frequência de maneira consciente, a fim de aumentar a eficiência da rede como um todo. No caso da tecnologia LoRa, suas três principais faixas de frequência de operação são descontínuas, dificultando a estratégia adotada por canais, como nas redes IEEE 802.11. Além disso, por se tratar de um esquema de modulação de espalhamento espectral, a interferência inter-simbólica entre canais dentro de uma dessas faixas de frequência pode ser igualmente prejudicial à rede como um todo.

Nesse sentido, redes cognitivas e trocas adaptativas de faixas de operação da rede tornam-se uma alternativa interessante, buscando melhorar parâmetros físicos de qualidade da rede ao longo do tempo [Abdelfadeel et al. 2018, Figueiredo and Franco Silva 2020]. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de estudar, propor e avaliar uma técnica de tomada de decisão sobre trocas de frequência a fim de maximizar a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise ratio* - SNR), e também diminuir o número de trocas de frequência. Em [Figueiredo and Franco Silva 2020], os autores apresentam um método para melhorar os parâmetros citados. Entretanto, consideram para a tomada de decisão somente os valores das amostras mais recentes da SNR das mensagens LoRa em 433 MHz e 915 MHz. Em contraste, este trabalho propõe a consideração de uma média de $W_n - 1$ medidas anteriores e a medida mais atual como uma forma de amortecer efeitos pontuais e ruídos impulsivos que podem acontecer no ambiente de transmissão, onde W_n representa o tamanho da janela deslizante a ser empregada.

O restante deste artigo está organizado como segue: a Seção 2 apresenta alguns dos conceitos fundamentais sobre a comunicação LoRa que servem de subsídio para este trabalho. Na Seção 3 é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema, apresentando o estado da arte. Na Seção 4 é apresentada a solução proposta pelo trabalho para a melhoria de qualidade da comunicação LoRa em formato teórico. Na Seção 5 são apresentados os resultados dos experimentos práticos baseados na teoria apresentada para a proposta de janelas deslizantes. Por fim, na Seção 6 encontra-se a conclusão e avaliação dos resultados obtidos, além de propostas de trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

LoRaTM é um esquema de modulação digital de espalhamento de espectro proprietário da *Semtech Corporation*, e é baseado na modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*) para a comunicação [Semtech 2015]. Este esquema de modulação pondera o ganho na sensibilidade de detecção dos sinais, ao custo de menores taxas de comunicação. Isso se dá tanto pela modulação em si, quanto pelos parâmetros ajustáveis da modulação, cabendo ao projetista do sistema de comunicação a escolha desses parâmetros de acordo com a performance da rede esperada [Semtech 2015].

Algumas das vantagens que podem ser observadas na modulação LoRa são sua imunidade aos efeitos de multi-caminhos e *Doppler*, o longo alcance, e seu baixo con-

sumo energético [Semtech 2015]. Alguns de seus parâmetros de configuração mais importantes são: o Fator de Espalhamento (SF, ou *Spreading Factor*), a Largura de Banda (BW, ou *Bandwidth*) e a Taxa de Codificação (CR, ou *Coding Rate*). Além disso, vale lembrar que a LoRa é capaz de operar nas faixas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*, ou Industriais, Científicas e Médicas) de 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz.

A arquitetura de comunicação LoRa mais utilizada atualmente é a adotada pelo protocolo LoRaWAN¹ [The Things Network 2021], e pode ser vista na Figura 1. Esta arquitetura é composta por 4 principais elementos: os nós (também chamados de *end-nodes* ou também *devices*), os *gateways*, o servidor de rede (ou *Network Server*) e o servidor de aplicação (ou *Application Server*). O servidor de aplicação tem a finalidade de intermediar a comunicação de dispositivos geograficamente distantes. O servidor de rede funciona como *broker* para a aplicação LoRa, intermediando a comunicação entre os *gateways* e o servidor de aplicação. Já os *gateways* funcionam como pontos de acesso ou coordenadores na comunicação com os dispositivos, provendo a eles conectividade. Por fim, os dispositivos finais (*e.g.*, sensores, dispositivos inteligentes) são aqueles que utilizam da tecnologia LoRa para enviar e receber mensagens da Internet - e dos servidores de aplicações - através dos *gateways*.

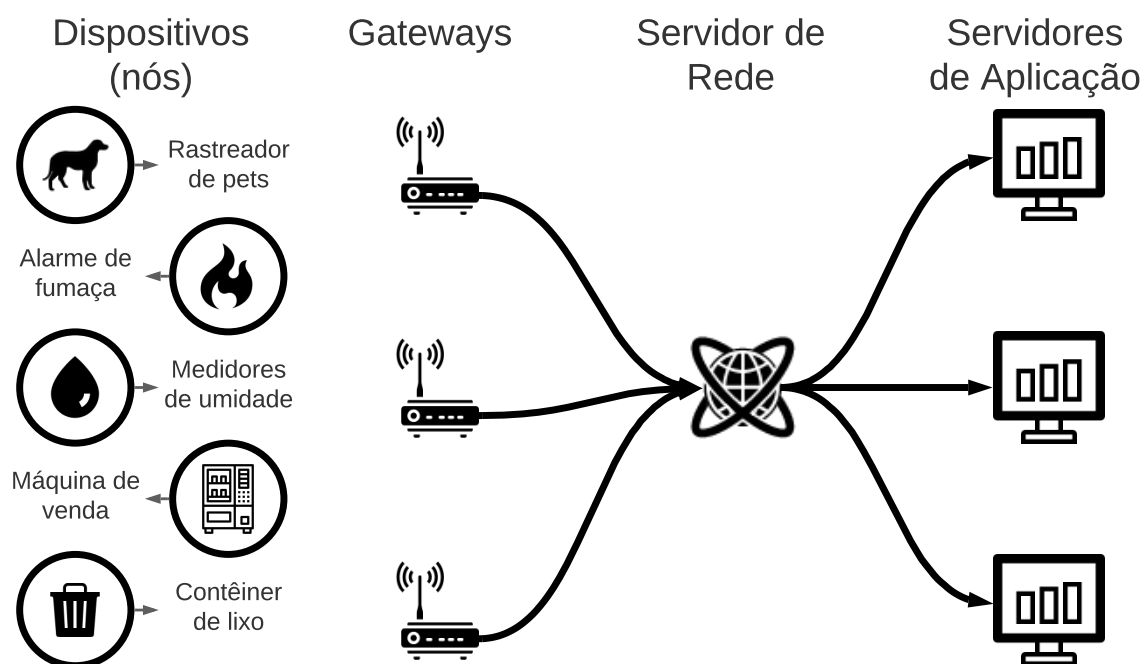


Figura 1. Arquitetura de comunicação LoRa através do protocolo LoRaWAN. Baseado na fonte [The Things Network 2021]

Em [Semtech 2015] a definição da capacidade de um canal LoRa (R_b) expresso em *bits/s* é representado pela Equação 1. Já em [Faber et al. 2020], os autores apresentam uma Equação que relaciona a BER (*Bit Error Rate*, ou taxa de erros de bit) em um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*, ou Ruído Aditivo Gaussiano Branco), com a energia por *bit* da densidade espectral de potência, dada por E_b/N_0 é representada por

¹<https://loro-alliance.org/about-lorawan/>

uma função de erro complementar (função Q ou função $erfc$) dada pela Equação 2. Ainda em [Faber et al. 2020], é apresentada uma equação que relaciona a E_b/N_0 com a SNR do sinal, dada pela Equação 3.

$$R_b = SF \times \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}} \quad (1)$$

$$BER = Q\left(\frac{\log_{12}(SF)}{\sqrt{2}} \times \frac{E_b}{N_0}\right) \quad (2)$$

$$\frac{E_b}{N_0} [dB] = SNR [dB] + 10 \log_{10}\left(\frac{BW}{R_b}\right) \quad (3)$$

Substituindo as Equações 1 em 3, e o resultado na Equação 2, encontra-se a Equação 4, que relaciona a BER da comunicação LoRa em um canal AWGN com o Fator de Espalhamento e a SNR medida do sinal. Vale observar que a Equação 4 não depende da largura de banda do sinal, mas somente da SNR medida e o Fator de Espalhamento.

$$BER = Q\left\{\frac{\log_{12}(SF)}{\sqrt{2}} \cdot \left[SNR [dB] + 10 \log_{10}\left(\frac{2^{SF}}{SF}\right)\right]\right\} \quad (4)$$

Por fim, pode-se ver na Figura 2 um gráfico gerado a partir da Equação 4. Observa-se que quanto maior for a SNR de um sinal, menor é a BER da comunicação. Além disso, para um mesmo valor de SNR, elevados valores de SF apresentam melhor desempenho numa comunicação.

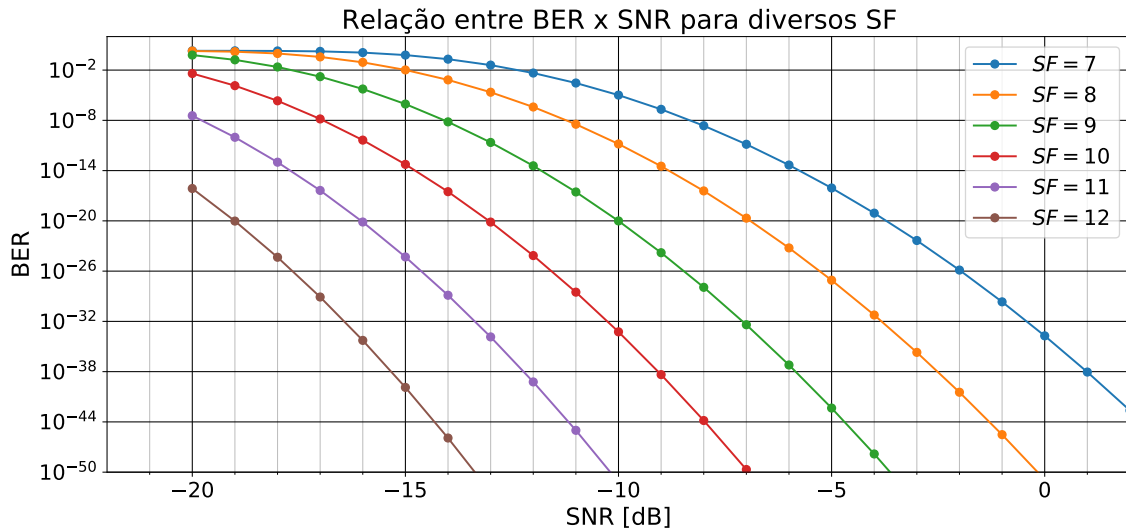


Figura 2. Relação entre BER e SNR para a modulação LoRaTM em um canal AWGN para diversos valores possíveis de SF.

Os conceitos apresentados nesta seção, assim como a relação BER-SNR demonstrada, servirão de base para as avaliações deste trabalho. Mais detalhes sobre a técnica proposta neste trabalho serão vistas adiante

3. Trabalhos Relacionados

Como apresentado, as redes LoRa têm sido amplamente exploradas, sendo alvo de intensos estudos ao longo dos últimos anos. Em especial, destacam-se os ambientes de *Smart Cities* [Varsier and Schwoerer 2017, Pasolini et al. 2018, Centenaro et al. 2016] e *Smart Farms* [Codeluppi et al. 2020, Miles et al. 2020, Ramli et al. 2020]. Nesta seção serão apresentados os trabalhos relacionados ao principal tópico de investigação desta pesquisa, relacionados a otimização dos parâmetros LoRa em prol de ganhos em métricas como SNR, cobertura e qualidade do sinal.

Os autores de [Ramli et al. 2020] propõem uma rede adaptativa onde alterna-se entre os protocolos LoRaWAN e o IEEE 802.11ac [Perahia and Stacey 2013] para situações onde há menor e maior necessidade de transmissão de volume de dados, respectivamente. Entretanto, não há propostas de melhoria de performance no que diz respeito aos parâmetros LoRa. Vale ressaltar que, conforme apresentado pelo próprio autor, a PER (*Packet Error Rate*, ou Taxa de Erros de Pacotes) para longas distâncias para o IEEE 802.11ac é significativamente mais alto quando comparado com o LoRa em médias e longas distâncias.

No artigo de [Bor et al. 2016], os autores realizaram uma avaliação experimental dos impactos da configuração do SF em um ambiente urbano. Eles descobriram que a escalabilidade da rede aumenta quando os parâmetros são configurados para diminuir o tempo de transmissão das mensagens, verificado através de um experimento que mostra a menor ocupação no espectro de frequências. Este tipo de técnica é útil para aumentar a escalabilidade, e deve ser utilizada para configurar dinamicamente os parâmetros da rede LoRa. Entretanto, apesar dos resultados promissores, os autores não apresentaram um resultado prático dessa técnica, ficando somente com resultados simulados.

Na área teórica é possível citar diversos outros trabalhos. Os autores de [Reynders et al. 2017] propõem a otimização do fator de espalhamento para minimizar a probabilidade de colisão de pacotes, especialmente em dispositivos distantes de estações base. No artigo de [Abdelfadeel et al. 2018], é proposto pelos autores um algoritmo que otimiza a potência de transmissão dos nós e fatores de espalhamento balanceando-os de maneira a equalizar a taxa de transmissão de dados pela rede, partindo do pressuposto que todos os nós alcançam o *Gateway*. Em [Jeon and Jeong 2020], diferentemente dos outros trabalhos, os autores apresentam uma proposta de ajuste adaptativos de potência de transmissão e taxa de transmissão de dados em *upload* baseado na performance observada e melhorias no canal de *upload*, e nenhum outro parâmetro.

Já no trabalho de [Figueiredo and Franco Silva 2020], os autores propuseram uma técnica para aumentar a eficiência das redes LoRa com resultados práticos. Os autores exploraram as características de ortogonalidade apresentados por dispositivos comunicando-se em diferentes portadores de frequência para propor um algoritmo que avalia periodicamente a SNR de sinais nas bandas de 433 MHz e 915 MHz. A partir dessa avaliação, um nó primário (também conhecido como nó mestre) realiza a tomada de decisão de trocar a frequência de comunicação de toda a rede para a melhor das duas, ou permanecer na frequência atual, baseando-se pelas medidas de SNR destes canais. Entretanto, os resultados alcançados tiveram ganhos não muito significativos, visto que a média de ganhos em SNR foi de 4.68% e com elevado número de trocas de portadoras. Este elevado número de trocas é uma consequência da estratégia de tomada de decisão baseado nos valores

instantâneos de SNR medidos em ambas as frequências: eventos aleatórios de ruídos impulsivos dentro do período de análise (que podem ser causados por um outro transmissor operando na mesma faixa de frequência, por exemplo) nas duas portadoras podem distorcer a medida de SNR em um dos canais, levando-o a ter menor SNR do que sua média histórica. Dessa maneira, o algoritmo proposto pode tomar uma má decisão, devido a ruídos impulsivos presentes no meio de comunicação.

Em contraste com a metodologia abordada por [Figueiredo and Franco Silva 2020], este trabalho propõe a utilização de um histórico de medidas de SNR e um tomador de decisão com base não em uma medida mais recentemente amostrada, mas na média da SNR das amostras do histórico. Essa abordagem tende a reduzir o erro da tomada de decisão, causado pelo efeito filtrante da média deslizante. Dessa forma, este trabalho se propõe a apresentar uma abordagem prática para melhoria da comunicação LoRa através da adaptação de portadora do sinal.

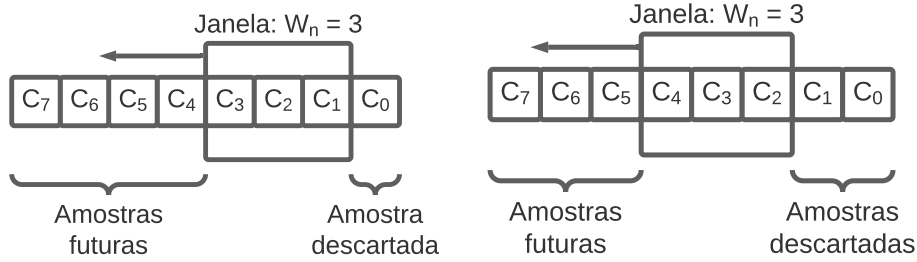
4. Proposta

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi implementada uma pequena rede LoRa construída em topologia estrela, com um nó primário e nós secundários. Dois algoritmos distintos foram desenvolvidos para operarem nos nós primários e secundários (master/slave - primário/secundário - dispositivos/*gateway*).

Nesta proposta, existem dois momentos do algoritmo: (i) a etapa de transmissão de dados e (ii) a etapa de controle da rede. Na primeira etapa, uma sequência de mensagens é enviada pelos secundários em direção ao nó primário, cujo único objetivo é gerar registros de SNR ao longo do tempo na rede (representado pela chamada da função **send-DataPacket()** no Algoritmo 3). Após essa sucessão de mensagens alcançar um limite pré-definido, o sistema entra na fase de controle. Nesta etapa, o nó primário transmite algumas mensagens contendo qual a próxima configuração a ser testada, composta pelos seguintes parâmetros: SF , BW e $F_{carrier}$ (frequência da portadora), e aguarda uma resposta dos nós secundários. A resposta deve vir com a configuração anterior e, após um tempo também acordado pelo nó primário, todos os dispositivos trocam de configuração. Este processo se repete até que todas as configurações possíveis tenham sido testadas. De posse dessas informações, o nó primário realiza um cálculo de janela deslizante simples da SNR medida das respostas dos secundários em uma determinada configuração com relação aos outros pontos de avaliação e finalmente toma a decisão de trocar a frequência da portadora, ou permanecer na atual. Apesar do algoritmo realizar a troca de configurações, medidas simultâneas em todas as configurações foram mantidas por motivos de consulta e análise posterior dos dados medidos em cada configuração.

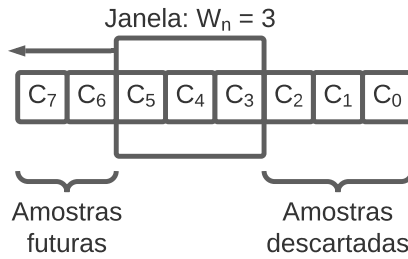
O estudo observou o comportamento do algoritmo de janela deslizante simples sobre as medidas de SNR percebidas nas mensagens. As configurações consideradas para tamanho de janelas são as de tamanho $W = 10, 20, 30$ e 40 amostras para efeitos de comparação entre diferentes tamanhos de janelas. A Figura 3 apresenta o princípio de funcionamento da janela deslizante, o que também pode ser verificado no Algoritmo 1.

O Algoritmo 1 apresenta a operação de deslizamento da janela de valores. Dada uma janela deslizante representada por $window$ de W_n elementos, primeiramente realiza-se o deslocamento dos elementos da janela, incrementando-se o índice dos elementos em um. Logo, uma janela de 3 elementos $J[3] \leftarrow [C_2, C_1, C_0]$ após a operação fica como



(a) Etapa 1: Estado 1 da janela, em um tempo qualquer.

(b) Etapa 2: Estado da janela onde um elemento foi descartado. Os elementos da janela foram deslocados e um novo elemento entrou no começo da janela.



(c) Etapa 3: Estado com descarte de elemento, deslocamento e inclusão de amostras ocorrendo novamente.

Figura 3. Princípio de funcionamento da janela deslizante no âmbito da proposta.

se segue: $J[3] \leftarrow [C_2, C_2, C_1]$. Em seguida, realiza-se uma nova leitura de pacote de mensagem LoRa e seu respectivo valor de SNR é registrado no índice 0 da janela, como segue para o exemplo utilizado: $J[3] \leftarrow [C_3, C_2, C_1]$. Note que, após a operação de deslocamento, a amostra C_0 é descartada. Este processo é ilustrado pela Figura 3. Na Figura 3(a), pode ser vista uma primeira etapa da janela deslizante. As amostras C_1 , C_2 e C_3 fazem parte da janela deslizante, a amostra C_0 já fez parte da janela e foi descartada, e o restante das amostras ainda vai ser coletada, e está sendo apresentada de forma didática. Na prática, elas ainda não estão registradas na memória do sistema. Na segunda etapa, representada pela Figura 3(b), uma nova amostra C_4 chega ao microcontrolador e a janela é então deslocada para a esquerda, integrando esta amostra ao conjunto e descartando a amostra C_1 . O processo se repete na terceira etapa, representada pela Figura 3(c).

Algoritmo 1: Janela deslizante de tamanho W_n

```

1 Function slidingWindow ( $W_n, window$ ):
2   for  $i \leftarrow 1$  to  $W_n$  do
3      $window[i] \leftarrow +window[i - 1]$ ;
4   end for
5    $window[0] \leftarrow snr.packet[f]$ ;
6   return  $window$ ;

```

O Algoritmo 2 apresenta a lógica de média dos valores. Um acumulador é criado e, em seguida, somam-se os valores de todos os elementos da janela deslizante para finalmente retornar o valor dessa soma dividido número de elementos da janela. Pode se perceber que, da forma que o Algoritmo 2 é apresentado até o momento, trata-se somente de um algoritmo que calcula a média de uma lista de valores. Entretanto, a combinação dos Algoritmos 1 e 2 implementa a operação de média móvel deslizante. Portanto, o Algoritmo 3 apresenta a devida organização dos outros dois algoritmos e realiza os testes para tomada de decisão da troca de frequência da comunicação LoRa, considerando os valores de SF e BW fixos para melhor compreensão da técnica proposta.

Algoritmo 2: Médias dos elementos da janela de tamanho W_n

```

1 Function movingAverage ( $W_n, window$ ) :
2    $avg \leftarrow 0$ 
3   for  $i \leftarrow 0$  to  $W_n$  do
4      $avg \leftarrow avg + window[i]$ 
5   end for
6   return  $avg/W_n$ ;

```

Algoritmo 3: Cognitive LoRa for Moving Average

```

1  $F = \{433, 915\}$  // Frequências de portadoras
2  $SF = \{11\}$  // Fatores de Espalhamento
3  $BW = \{250\}$  // Larguras de Banda
4  $W = W_0$  // Largura da janela deslizante
5  $samples_{433}[W], samples_{915} \leftarrow \{0\}, \{0\}$ 
6  $\gamma \leftarrow 9$  // número de pacotes de comunicação a serem enviados
7 while exist packet to be send do
8   if  $control < \gamma$  then
9      $control \leftarrow control + 1$ ; // Fatores de Espalhamento
10    sendDataPacket()
11  else
12     $control \leftarrow 0$ 
13     $samples_{433} \leftarrow slidingWindow(W, samples_{433})$ 
14     $samples_{915} \leftarrow slidingWindow(W, samples_{915})$ 
15     $avg_{433} \leftarrow movingAverage(W, samples_{433})$ 
16     $avg_{915} \leftarrow movingAverage(W, samples_{915})$ 
17    if  $avg_{433} > avg_{915}$  then
18      setFrequencyTo433()
19    else
20      setFrequencyTo915()
21    end if
22  end if
23 end while

```

5. Avaliação

Para a avaliação da proposta, a técnica apresentada na seção 4 foi implementada em um cenário real com dispositivos LoRa operando tanto na frequência de 433 MHz quanto na de 915 MHz, conforme apresentado por [Figueiredo and Franco Silva 2020]. A partir da implementação, diversas medidas foram coletadas a durante o período em que o sistema ficou *online*. Por conveniência, decidiu-se por manter o valor de $CR = 4/5$.

A Figura 4 apresenta exemplos de gráficos comparando as técnicas sem janela, referente à técnica de [Figueiredo and Franco Silva 2020] (Figura 4(a)), e com janelas de 10 e 20 elementos (Figuras 4(b) e 4(c)), para $SF = 10$ e $BW = 125$ kHz, referentes à proposta deste trabalho.

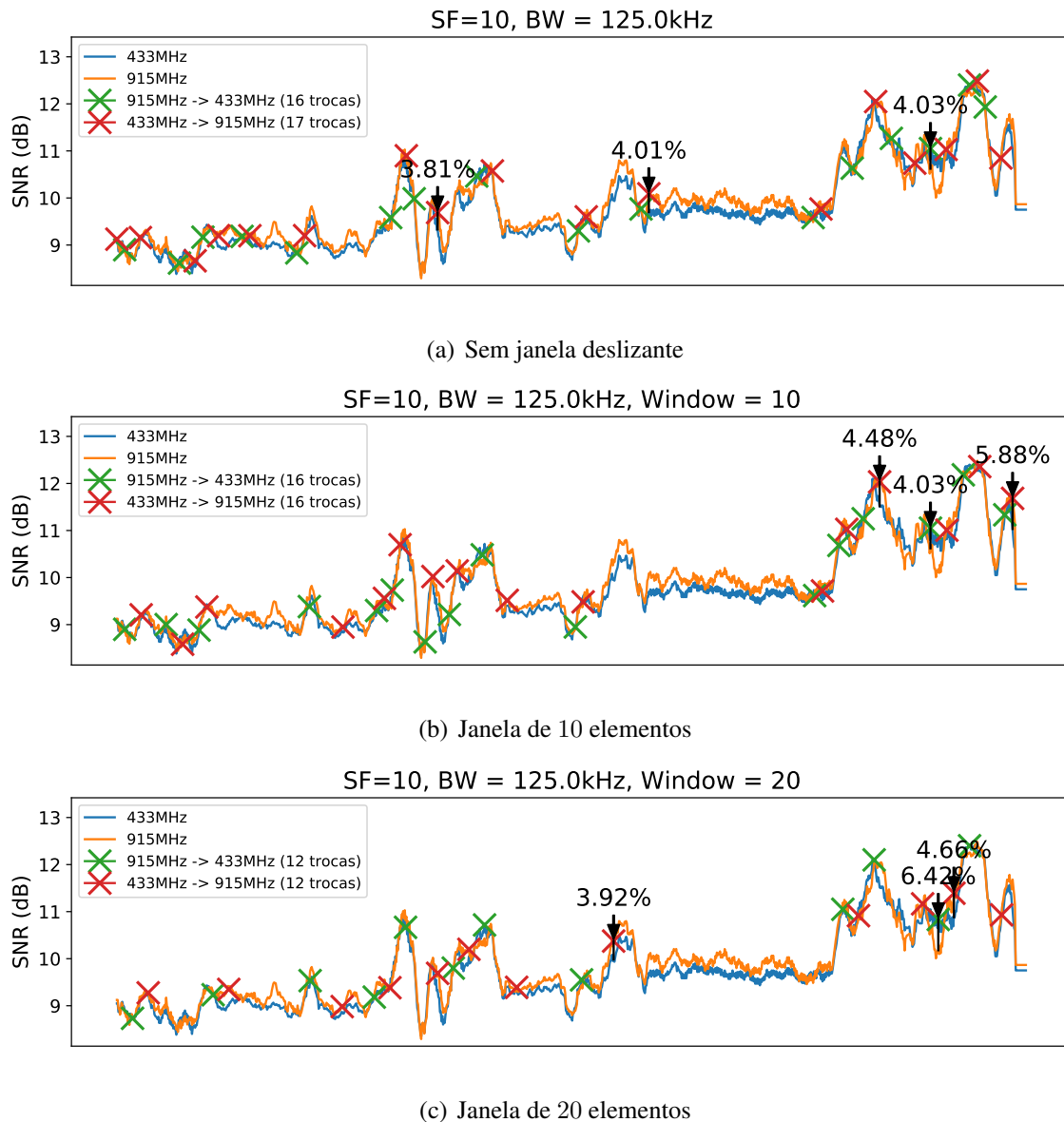


Figura 4. Relação entre BER e SNR para a modulação LoRaTM em um canal AWGN para diversos valores possíveis de SF.

Observando as figuras, pode-se perceber que, para a configuração apresentada, há um ligeiro aumento das SNR máximas avaliadas ao aumentar-se o tamanho das janelas. Também observamos uma diminuição do número de trocas à medida que se aumenta o tamanho da janela, especialmente para a janela de 20 elementos.

A Tabela 1 apresenta um resumo de todas as configurações observadas e seus respectivos ganhos de SNR. A coluna de médias representa a média de todas as 27 medidas realizadas de uma mesma configuração (sem janela, janela de 10 elementos, etc). As me-

didadas 1, 2 e 3 de cada configuração de janela deslizante representam a maior, segunda maior e terceira maior variação no ganho de SNR causado pela troca, respectivamente. Os valores destacados representam o maior ganho observado (no caso, de 11, 89%) e a melhor média de ganhos observada (no caso, de 4, 60%).

A Tabela 2 apresenta o número de trocas apresentada por cada uma das configurações e a média das 9 medidas do número de trocas para cada uma das configurações, e os valores destacados representam a maior e menor média de trocas de frequência de operação.

Tabela 1. Resumo dos três maiores ganhos de SNR para cada configuração e suas médias.

Janela	Medida	BW									Média
		125 kHz			250 kHz			500 kHz			
		SF			SF			SF			
		10	11	12	10	11	12	10	11	12	
Sem	1	4.03%	2.91%	4.74%	4.54%	4.77%	3.72%	2.98%	2.31%	3.88%	3.17%
	2	4.01%	2.50%	3.60%	3.80%	2.56%	2.98%	2.44%	2.19%	2.49%	
	3	3.81%	2.45%	3.53%	3.76%	2.23%	2.92%	2.03%	2.10%	2.37%	
w = 10	1	5.88%	9.79%	7.85%	5.90%	3.33%	5.29%	9.33%	3.31%	5.17%	4.60%
	2	4.48%	5.11%	4.49%	3.73%	2.65%	4.91%	4.50%	2.81%	3.98%	
	3	4.03%	4.64%	3.90%	3.36%	1.97%	4.90%	2.59%	2.40%	3.80%	
w = 20	1	6.42%	4.09%	11.89%	3.00%	3.32%	5.04%	8.14%	3.33%	8.20%	4.34%
	2	4.66%	4.04%	5.50%	2.50%	2.89%	4.81%	2.54%	2.67%	5.06%	
	3	3.92%	3.09%	4.07%	2.02%	2.68%	4.35%	2.30%	2.22%	4.36%	
w = 30	1	4.10%	4.32%	5.09%	5.90%	4.74%	4.83%	4.26%	5.39%	4.36%	3.61%
	2	3.21%	3.70%	4.67%	2.84%	1.47%	4.51%	2.99%	5.33%	4.17%	
	3	1.92%	2.48%	3.83%	1.96%	1.44%	3.64%	2.30%	2.80%	1.19%	
w = 40	1	3.21%	5.91%	7.39%	4.50%	2.56%	3.53%	2.97%	4.49%	2.60%	2.89%
	2	2.06%	3.12%	4.01%	2.17%	1.46%	3.21%	2.96%	2.31%	2.29%	
	3	1.29%	2.58%	1.72%	1.31%	1.39%	3.02%	1.45%	2.26%	2.24%	

Da Tabela 1, percebe-se um leve aumento do ganho médio de SNR para a técnica com janela de $W = 10$ e um aumento um pouco menor para a janela de $W = 20$. A janela com 30 elementos apresentou um aumento bem menor do que as outras e a janela de 40 elementos apresentou o menor ganho de todas as técnicas.

Observando-se as amostras da Tabela 1 individualmente, é possível perceber que a janela de tamanho $W = 20$ apresentou uma amostra que representa o melhor resultado de todos os apresentados na tabela, com 11, 89% de ganho de SNR. Entretanto, a janela de tamanho $W = 10$ foi a que apresentou melhor consistência de ganhos de SNR, fato este comprovada pela maior média de ganhos.

Analisando a Tabela 2, analisa-se que a técnica proposta com tamanho de janela igual a 10 elementos foi a que, na média, mais apresentou trocas de banda da portadora da modulação, superando inclusive a técnica sem janela. A janela de $W = 30$ apresentou uma redução média moderada do número de trocas de frequência e as janelas de 30 e 40 elementos apresentaram um redução significativa com relação à técnica sem janela, chegando esta última a apresentar uma redução de mais de 50% do número médio de trocas, quando comparado com a técnica sem janela.

A partir das médias nas Tabelas 1 e 2, a Tabela 3 foi construída e apresenta a melhoria nos ganhos de SNR em comparação percentual com os resultados apresentados pela técnica sem janela deslizante (referente a [Figueiredo and Franco Silva 2020]). Para cada

Tabela 2. Resumo do número de trocas realizada por cada configuração avaliada.

Janela	BW									Média
	125 kHz			250 kHz			500 kHz			
	SF			SF			SF			
	10	11	12	10	11	12	10	11	12	
Sem	33	32	32	38	37	24	15	13	22	27.333
w = 10	32	52	38	46	46	39	30	28	28	37.667
w = 20	24	29	22	23	32	22	15	21	18	22.889
w = 30	19	19	17	19	18	17	12	13	15	16.556
w = 40	14	17	11	13	14	15	9	9	13	12.778

Tabela 3. Melhorias da técnica de janela deslizante relativas aos resultados médios sem janela.

Janela	Ganho de SNR	Número de trocas
10	44.89%	37.80%
20	36.73%	-16.26%
30	13.77%	-39.43%
40	-8.92%	-53.25%

uma das janelas avaliadas neste trabalho, é apresentada também a redução do número de trocas de portadora da modulação comparativamente à técnica sem janela. Nesta tabela, percebe-se que a janela de $W = 10$ elementos foi a que apresentou melhor resultado de ganho de SNR, apresentando uma melhoria de 44, 89% do ganho quando comparada com os ganhos médios da técnica sem janela. Entretanto, apresentou também um aumento de 37, 80% no número de trocas de frequência. Um número significativamente mais alto.

Em contraste, a janela deslizante com $W = 40$ elementos foi a que apresentou maior redução do número médio de trocas de portadora, com uma redução de 53, 25% quando comparado com a técnica sem janela. Mas, foi a técnica que apresentou menor ganho de SNR, com uma redução de 8, 92% no ganho médio de SNR quando comparado com a técnica sem janela.

Avaliando os resultados obtidos, observa-se uma possível diminuição do número de trocas com o aumento do comprimento da janela, e uma faixa ótima de aumento da SNR com janelas de 0 a 30 elementos, sendo a janela de 0 elementos representada pela metodologia sem janela deslizante. Ponderando as duas avaliações, a metodologia com janela de 20 elementos pode ser considerada a mais eficiente, apresentando razoável redução no número de trocas de frequências mesmo com ganhos de SNR.

6. Conclusões

Considerando os resultado obtidos em [Figueiredo and Franco Silva 2020], nossa proposta apresenta ganhos em relação à taxa de perda de *bits*, melhorando a SNR do sinal, que pode ser comprovado pela relação mostrada na Figura 2. Além disso, esta proposta diminui consideravelmente o número de trocas de configuração. Destacamos que o trabalho [Figueiredo and Franco Silva 2020] será utilizado como base de comparação deste trabalho.

A técnica de janela deslizante apresentou-se bastante favorável quando comparada com a técnica sem janela. Percebe-se que, devido à propriedade filtrante das janelas deslizantes, o número de trocas diminui à medida que se aumenta o tamanho das janelas. Entretanto, este efeito pode levar o algoritmo decisor a realizar más trocas de frequências, evidenciadas pelo menor ganho apresentado nas janelas deslizantes menores.

Conferindo o resultados médios de ganhos de SNR e números de saltos apresentados pelas tabelas 1 e 2 respectivamente, as melhores técnicas analisando individualmente cada um desses resultados foram o de janela deslizante com $W = 10$ para ganho de SNR, e o de janela deslizante com $W = 40$ para número de saltos.

Os resultados relativos da técnica com janelas apresentados na Tabela 3 mostram que, o tamanho de janela que apresentou a melhor combinação ganho de SNR e redução do número de trocas de portadora é a janela com tamanho $W = 20$. Nessa configuração houve uma melhoria de 36,73% do ganho de SNR quando comparado com o ganho de SNR da técnica sem janela, e uma redução de 16,26% do número de trocas de frequência quando comparado com a técnica sem janela.

Assim, a hipótese que a janela deslizante diminuiria o número de trocas de frequência foi comprovada apenas para as janelas de 20, 30 e 40 elementos, visto que a janela de 10 elementos apresentou maior número de trocas. Entretanto, a hipótese que implementar uma janela deslizante para cálculo de média móvel de SNR como técnica de tomada de decisão para a troca de frequência de portadora da comunicação LoRa foi parcialmente comprovada, visto que comprimentos de janelas elevadas diminuiram o ganho ao invés de aumentá-lo. Ainda assim, a técnica pode comprovar que para uma faixa determinada de tamanho da janela houve um aumento considerável quando comparado relativamente com a técnica sem janela. Estes ganhos representam incrementos na qualidade da comunicação LoRa, que podem ser comprovados na Figura 2, que apresenta a relação da diminuição da BER com o aumento da SNR do sinal. Logo, a técnica de janela deslizante se mostrou superior à técnica sem janela, com a ressalva de que essa superioridade depende do tamanho da janela e qual dos parâmetros analisados (número de trocas e ganho de SNR) é mais importante para uma aplicação ou outra.

Por fim, de acordo com [Abuarqoub et al. 2017], até o ano de 2020 foi esperado que houvessem mais de 25 bilhões de dispositivos conectados à internet. Estudos como esse, que buscam melhorar cada vez mais a eficiência e a eficácia dos dispositivos para se conectarem a redes de computadores, são de fundamental importância para prover avanços nas interconexões dos dispositivos.

Como trabalhos futuros, pretende-se explorar outras metodologias de tomadas de decisão para troca de frequências, como outros tipos de janelas deslizantes, impactos das configurações e do tamanho das janelas nas comunicações, assim como a utilização de média móvel exponencial ponderada. Além disso, avaliar o impacto da técnica em conjunto com outras tecnologias e espectros de frequência, além do LoRa, para LPWAN é também uma pretensão dos autores.

Agradecimentos

Agradecemos à UFJF e FAPEMIG (APQ-00999-18) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- Abdelfadeel, K. Q., Cionca, V., and Pesch, D. (2018). Fair adaptive data rate allocation and power control in lorawan. In *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*, pages 14–15.
- Abuarqoub, A., Abusaimh, H., Hammoudeh, M., Uliyan, M., Abu-Hashem, M., Murad, S., Al-Jarrah, M., and Alfayez, F. (2017). A survey on internet of things enabled smart campus applications. pages 1–7.
- Bor, M. C., Roedig, U., Voigt, T., and Alonso, J. M. (2016). Do lora low-power wide-area networks scale? In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 59–67.
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., and Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, 23(5):60–67.
- Codeluppi, G., Cilfone, A., Davoli, L., and Ferrari, G. (2020). LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. *Sensors*, 20(7).
- Faber, M. J., van der Zwaag, K. M., dos Santos, W. G. V., d. O. Rocha, H. R., Segatto, M. E. V., and Silva, J. A. L. (2020). A theoretical and experimental evaluation on the performance of lora technology. *IEEE Sensors Journal*, 20(16):9480–9489.
- Figueiredo, L. M. and Franco Silva, E. (2020). Cognitive-LoRa: adaptation-aware of the physical layer in LoRa-based networks. In *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 1–6.
- Jeon, W. S. and Jeong, D. G. (2020). Adaptive uplink rate control for confirmed class a transmission in lora networks. *IEEE Internet of Things Journal*.
- Miles, B., Bourennane, E.-B., Boucherkha, S., and Chikhi, S. (2020). A study of lorawan protocol performance for iot applications in smart agriculture. *Computer Communications*, 164:148–157.
- O Sales, F., Marante, Y., Vieira, A. B., and Silva, E. F. (2020). Energy consumption evaluation of a routing protocol for low-power and lossy networks in mesh scenarios for precision agriculture. *Sensors*, 20(14):3814.
- Pasolini, G., Buratti, C., Feltrin, L., Zabini, F., De Castro, C., Verdone, R., and Andrisano, O. (2018). Smart city pilot projects using lora and ieee802. 15.4 technologies. *Sensors*, 18(4):1118.
- Perahia, E. and Stacey, R. (2013). *Next generation wireless LANs: 802.11 n and 802.11 ac*. Cambridge university press.
- Ramli, M. R., Daely, P. T., Kim, D.-S., and Lee, J. M. (2020). Iot-based adaptive network mechanism for reliable smart farm system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170:105287.
- Reynders, B., Meert, W., and Pollin, S. (2017). Power and spreading factor control in low power wide area networks. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6.

- Semtech (2015). *LoRa® Modulation Basics*. Semtech Corporation, 2 edition. AN1200.22.
- The Things Network (2021). Lorawan architecture. [Online; Acessado em: 15 de abril de 2021].
- Varsier, N. and Schwoerer, J. (2017). Capacity limits of lorawan technology for smart metering applications. In *2017 IEEE international conference on communications (ICC)*, pages 1–6. IEEE.
- Wang, H. and Fapojuwo, A. O. (2017). A Survey of Enabling Technologies of Low Power and Long Range Machine-to-Machine Communications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(4):2621–2639.