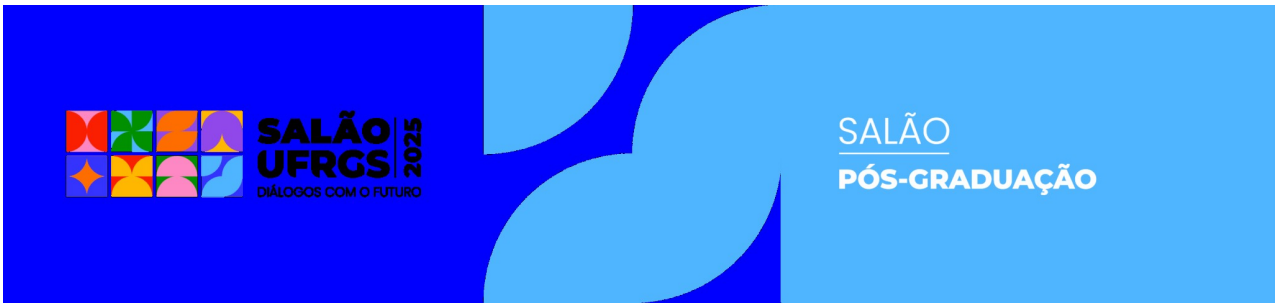


Evento	Salão UFRGS 2025: I SALÃO DA PÓS-GRADUAÇÃO
Ano	2025
Local	Campus do Vale - UFRGS
Título	Estratégias de compensação do efeito doppler na comunicação entre satélites LEO e estações terrestres utilizando LoRa
Autor	EDERSON RIBAS MACHADO
Orientador	IVAN MÜLLER

RESUMO: A utilização de constelações de satélites em órbitas terrestres baixas (LEO), especialmente pequenos satélites, tem se mostrado uma alternativa promissora para fornecer conectividade a dispositivos de coleta de dados em áreas remotas sem cobertura de rede. Nesse contexto, a modulação LoRa destaca-se por oferecer alto alcance, baixo consumo de energia e robustez a interferências, tornando-se uma escolha atrativa em comparação com outras técnicas. Contudo, o movimento relativo dos satélites LEO em relação às estações terrestres, com velocidades próximas a 7,8 km/s, introduz um desvio de frequência significativo no canal devido ao efeito Doppler. Esse fenômeno pode comprometer severamente a comunicação. Em ambientes remotos, os chamados nós remotos — ou nós IoT (do inglês *Internet of Things*) — são responsáveis por enviar dados de sensores aos satélites. Esses dispositivos, frequentemente alimentados por painéis solares e baterias, buscam reduzir o consumo energético e garantir a continuidade do serviço. Porém, o efeito Doppler afeta de maneira diferenciada os parâmetros configuráveis da modulação LoRa, impactando especialmente os fatores de espalhamento (SF) mais elevados, como SF = 10, 11 e 12, que são justamente os mais indicados para aplicações de longo alcance e baixo consumo. Diante desse cenário, este trabalho propõe uma técnica de mitigação do efeito Doppler na modulação LoRa, voltada para SFs elevados, visando otimizar a comunicação entre satélites LEO e nós IoT remotos. Diversos estudos disponíveis na literatura demonstram o impacto do efeito Doppler sobre diferentes arranjos de parâmetros LoRa. No entanto, a maioria deles não aprofunda a análise sobre o processo de demodulação. Como objetivo secundário, este trabalho propõe um estudo sobre o impacto do efeito Doppler na demodulação dos símbolos LoRa, as unidades básicas da comunicação, com foco no desvio de frequência acumulado ao longo de uma sequência de símbolos. Esse estudo encontra-se em sua fase final, com a produção de três artigos técnicos: dois destinados a periódicos científicos (*journals*) e um para apresentação em conferência. A técnica de mitigação proposta utiliza a taxa de erro de símbolos (SER) como métrica e foca na periodicidade do erro causado pelo efeito Doppler durante a sincronização dos pacotes LoRa. A revisão bibliográfica abrange o estado da arte do sincronismo e técnicas de mitigação, além da análise de aplicações LoRa de engenharia reversa com SDRs, para viabilizar a implementação prática. A tese envolve simulação, emulação e experimentação com sinais reais armazenados de satélites, utilizando amostras IQ. Atualmente, além da redação dos artigos, está em curso uma análise comparativa de métodos para medição da variação do Doppler, bem como iniciativas de colaboração com grupos de pesquisa no Brasil e no exterior. Segundo o cronograma, a terceira de cinco etapas planejadas está em fase de conclusão. A previsão para a finalização da tese e apresentação dos resultados finais é agosto de 2026.

PALAVRAS-CHAVE: LoRa; Efeito Doppler; Satélites LEO; Comunicação IoT.