



GNU RADIO: APLICAÇÃO DO RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE NO ENSINO PRÁTICO DE COMUNICAÇÕES DIGITAIS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6160

Autores: ISABELY SAMARA SIMÃO DE MATOS, VINÍCIUS JOSÉ WANDERLEY VIEIRA, LUCAS MEDEIROS CARNEIRO COSTA, MARIA DA CONCEIÇÃO ZELO BARBOSA PATRÍCIO, VINÍCIUS SILVA SIMÃO, SUZETE ÉLIDA NÓBREGA CORREIA

Resumo: O uso do GNU Radio como plataforma educacional possibilita um ensino prático e dinâmico da modulação por Deslocamento de Fase Diferencial (DPSK) em cursos de Engenharia de Telecomunicações. Ao integrar metodologias de aprendizagem ativa e tecnologias de Rádio Definido por Software (SDR), os alunos podem explorar cenários reais de comunicação, ajustando parâmetros como níveis de ruído e desvios de frequência da portadora. O ambiente de simulação desenvolvido permite a visualização e análise das constelações DPSK, destacando a robustez da modulação frente a degradações do canal e instabilidades de frequência. Os resultados demonstram que o DPSK mantém a integridade dos símbolos sem necessidade de recuperação da portadora, reforçando sua aplicabilidade em condições adversas. Essa abordagem aumenta o engajamento dos estudantes, consolida o conhecimento teórico por meio da experimentação e apoia a modernização do ensino em engenharia.

Palavras-chave: GNU Radio, Modulação DPSK, Rádio Definido por Software

GNU RADIO: APLICAÇÃO DO RÁDIO DEFINIDO POR SOFTWARE NO ENSINO PRÁTICO DE COMUNICAÇÕES DIGITAIS

1 INTRODUÇÃO

O ensino em Engenharia de telecomunicações nas Instituições de Ensino Superior (IES) tem passado por uma transformação, ao incorporar metodologias ativas que envolvem o aluno em atividades práticas e colaborativas, em contraste com a abordagem clássica centrada em aulas expositivas e demonstrações estáticas (PONCIANO et al.; 2016). Esses métodos têm se mostrado eficazes na promoção do engajamento e na consolidação de conceitos teóricos por meio da aplicação direta em problemas reais (GOMES et al.; 2021).

Cursos de engenharia de telecomunicações tradicionalmente empregam laboratórios analógicos, nos quais os estudantes montam circuitos eletrônicos com componentes discretos para implementar técnicas de modulação e demodulação. Essa abordagem consolidada demanda um tempo elevado para montagens e está sujeita a erros, como conexões mal feitas, componentes defeituosos, entre outros, comprometendo os resultados e limitando a complexidade dos experimentos propostos em aula (COURSES.WASHINGTON.EDU, 2023). A introdução do conceito de Rádio Definido por Software (SDR - *Software-Defined Radio*), no qual funções antes implementadas em hardware analógico são substituídas por software, trouxe ganhos expressivos em flexibilidade, reconfigurabilidade e redução de custos.

Dentro desse paradigma, destaca-se a ferramenta de software livre GNU Radio como solução flexível e acessível, por fornecer blocos de processamento de sinais para a implementação de rádios definidos por software, permitindo a simulação de sistemas de comunicação completos, como modulação, a presença de ruídos, interferências e imperfeições de sincronismo na recepção. O GNU Radio, em particular desponta como estratégia pedagógica fundamental no ensino, possibilitando que os discentes explorem, de forma iterativa, diferentes arquiteturas e parâmetros de sistemas de comunicação sem necessidade de hardware dedicado (DINIZ, 2013; ALMALEH, 2019). Além de reduzir custos, o uso do GNU Radio apoia os princípios das metodologias ativas ao incentivar a experimentação autônoma, a investigação e a aprendizagem colaborativa (ALMEIDA, 2020; SILVA, 2022).

O GNU Radio pode ser usado com hardware de RF (*Radio Frequency*) externo de baixo custo e prontamente disponível para utilizar rádios definidos por software ou ser implementado em ambiente de simulação. É amplamente utilizado em pesquisa, indústria, escolas, governo e ambientes amadores para apoiar tanto a pesquisa de comunicações sem fio quanto os sistemas de rádio do mundo real (*About GNU Radio · GNU Radio*, 2025). Um exemplo prático de seu uso em instituições de ensino inclui a experiência da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde foi implementado um laboratório didático baseado em SDR para disciplinas de comunicações digitais. Nessa aplicação, os alunos puderam explorar modulações, canais ruidosos e sincronismo de forma interativa, elevando o nível de aprendizagem (DINIZ, 2013).

A adoção de sistemas digitais baseados em SDR no ensino de engenharia apresenta diversas vantagens em relação à abordagem analógica tradicional. Dentre essas vantagens destacam-se a reconfiguração rápida dos experimentos, a redução de custos com

equipamentos e a facilidade para implementar técnicas de modulação avançadas (COURSES.WASHINGTON.EDU, 2023). Essa abordagem é particularmente relevante para a exploração de modulações digitais como a DPSK (*Differential Phase Shift Keying*, ou chaveamento por deslocamento de fase diferencial, modulação amplamente utilizada em sistemas de comunicação óptica coerente, como no padrão ITU-T G.694.1 para redes DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*), devido à sua robustez frente a variações de fase e ausência de necessidade de recuperação de portadora (RAPPAPORT et al., 2022). Com base nisso, ferramentas como o GNU Radio já oferecem módulos prontos de modulação e demodulação para esse tipos de sistema digital, de modo que, em vez de montar circuitos dedicados, os estudantes podem configurar toda a experiência em software e observar em tempo real o comportamento de todo o sistema digital, correlacionando teoria e prática.

Desta forma, este artigo apresenta a implementação de um sistema completo de modulação DPSK utilizando a plataforma GNU Radio para a recepção, processamento e análise de sinais diferenciais. A aplicação desenvolvida serve como prática experimental para disciplinas, como Princípios de Telecomunicações e Comunicações Digitais, nos cursos de graduação em Engenharia Elétrica e Telecomunicações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modulação em DPSK

A modulação por deslocamento de fase diferencial (DPSK) é uma variação da PSK convencional em que a informação binária não é codificada no valor absoluto da fase da portadora, mas na diferença de fase entre símbolos consecutivos. Isso dispensa o circuito de recuperação de portadora exigido em PSK coerente (PROAKIS e SALEHI, 2007). Em outras palavras, enquanto na PSK a fase absoluta representa os bits (por exemplo, 0° para o bit 0 e 180° para o bit 1), na DPSK utiliza-se a variação de fase em relação ao símbolo anterior para representar os dados.

A codificação diferencial no DPSK para cada bit b_k (que pode ser 0 ou 1) é baseado na fase do símbolo anterior, representada por ϕ_{k-1} . Caso o bit for 0, a fase é permanece a igual à do símbolo anterior; se for 1, é acrescentado um deslocamento de 180° (ou π radianos), assim a fase atual ϕ_k é dada por:

$$\phi_k = \phi_{k-1} + \pi b_k \quad (1)$$

Se for necessário transmitir dois bits por símbolo (caso DQPSK), em vez de apenas acrescentar ou não 180° , é usado quatro possíveis passos de fase (0° , $\pm 90^\circ$, 180°), correspondendo às combinações 00, 01, 11, 10 respectivamente. Seguindo, o sinal de transmissão $s(t)$ é basicamente uma portadora senoidal de amplitude A cujo argumento traz a frequência central f_c e a fase atual ϕ_k :

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \phi_k), \quad kT \leq t < (k+1)T \quad (2)$$

Ou seja, durante cada intervalo de símbolo T a onda mantém uma fase fixa. No receptor, é coletada a amostra atual r_k e o sinal é atrasado em um símbolo para obter o r_{k-1} fazendo-se a multiplicação dos dois:

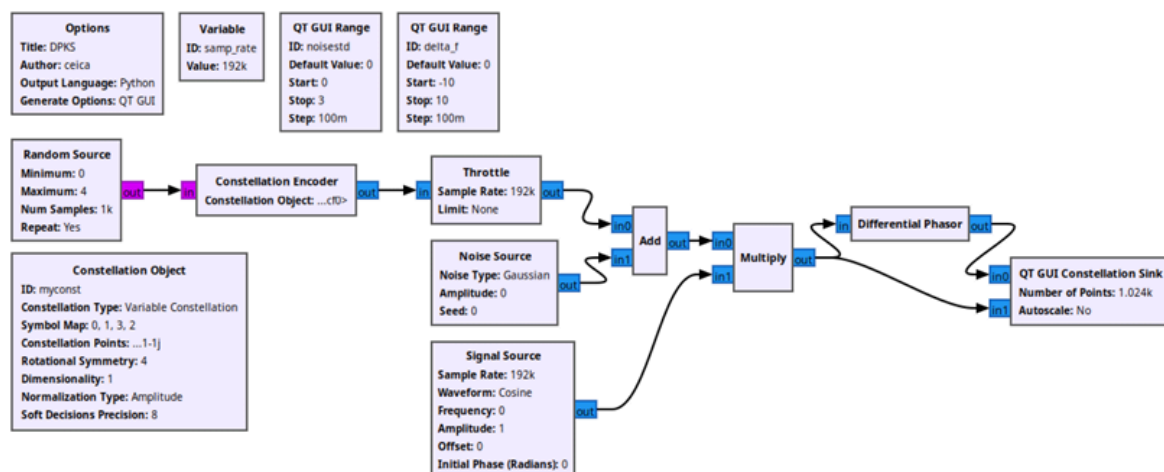
$$z_k = (r_k)(r_{k-1})^* \quad (3)$$

O valor z_k representa o sinal resultante da demodulação diferencial, obtido pelo produto da amostra atual com o conjugado da amostra anterior. Essa multiplicação anula a fase absoluta da portadora, deixando apenas a diferença entre as fases consecutivas. Por fim, é verificado o argumento (fase) de z_k : se for 0° , decodifica-se bit 0; e se for 180° decodifica-se bit 1.

3 METODOLOGIA

Para aproveitar o potencial do uso conjunto do GNU Radio no ensino de telecomunicações, foi preparado um experimento com base no trabalho de Bombay (2025) utilizando modulação diferencial de fase. O diagrama apresentado na Figura 1, mostra um fluxo de processamento de sinal usando o software *GNU Radio* na versão 3.10, com foco na análise da modulação por deslocamento de fase (DPSK). Cada bloco no diagrama tem uma função específica e importante no tratamento do sinal, desde a geração de uma fonte aleatória até a exibição do sinal por meio da constelação. Os valores selecionados para cada parâmetro dos blocos foram escolhidos para melhorar a qualidade de saída de áudio.

Figura 1 – Diagrama de blocos da Simulação DPSK.



Fonte: Elaboração própria (2025).

O experimento é composto por 10 blocos principais: *Random Source*, *Constellation Encoder*, *Throttle*, *Noise Source*, *Signal Source*, *Add*, *Multiply*, *Differential Phasor*, *QT GUI Constellation Sink* e *QT GUI Range*.

O bloco *Random Source* gera uma sequência de números aleatórios entre 0 e 4, com 1000 amostras repetidas continuamente. Esses números representam os símbolos que

serão modulados, e são passados ao Constellation Encoder, que utiliza uma constelação variável (especificada no bloco "Constellation Object") para mapear os símbolos em pontos no plano IQ, correspondentes ao esquema de modulação DPSK.

O *Constellation Object* define uma constelação com rotação simétrica e 4 pontos de modulação, o que caracteriza uma modulação do tipo QPSK, ajustada para operação diferencial. A modulação é baseada na amplitude e com uma precisão de 8 bits nas decisões suaves.

Após a codificação, o sinal é limitado pelo bloco *Throttle*, que regula a taxa de amostragem para 192 kHz, impedindo o uso excessivo da CPU durante simulações.

Em seguida, há uma adição de ruído ao sinal. O *Noise Source* gera ruído gaussiano com amplitude ajustável via o bloco *QT GUI Range*, que permite variações dinâmicas durante a execução da simulação. O ruído é somado ao sinal codificado pelo bloco *Add*, simulando a degradação natural que ocorre em canais de comunicação reais.

O sinal com ruído é então multiplicado pelo sinal gerado pelo *Signal Source*, que produz uma portadora do tipo cosseno, com frequência e amplitude definidas. Essa multiplicação tem o objetivo de simular a modulação do sinal. Após a modulação, o processo continua pelo bloco *Diferencial Phasor*, que realiza a demodulação diferencial, recuperando a informação de fase relativa entre os símbolos recebidos, o que é a base da demodulação DPSK.

Por fim, o sinal é exibido no *QT GUI Constellation Sink*, que mostra os pontos da constelação no plano complexo, permitindo a análise visual do desempenho da modulação sob diferentes condições de ruído e parâmetros.

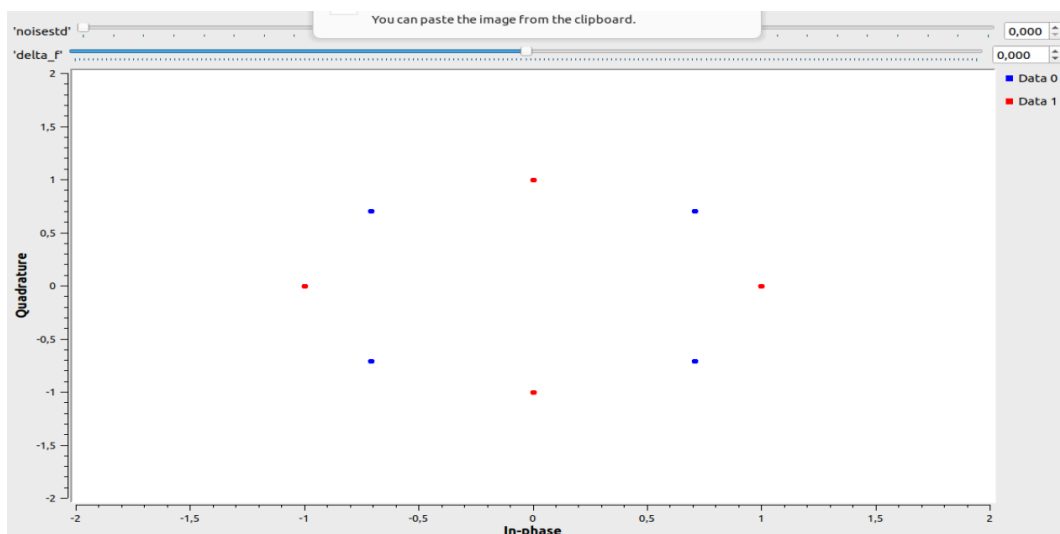
O sistema também conta com blocos *QT GUI Range* que permitem controlar dinamicamente os valores de ruído, frequência da portadora e ganho durante a simulação, oferecendo uma experiência interativa e mais realista.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de investigar os efeitos do chaveamento diferencial por deslocamento de fase, foi implementada uma prática experimental usando o *GNU Radio*. Os valores dos níveis de ruídos e da frequência de portadora foram ajustados através de análise empírica, permitindo avaliar seu impacto no desempenho da modulação. Esta etapa crítica demandou considerável esforço e tempo de ajustes finos.

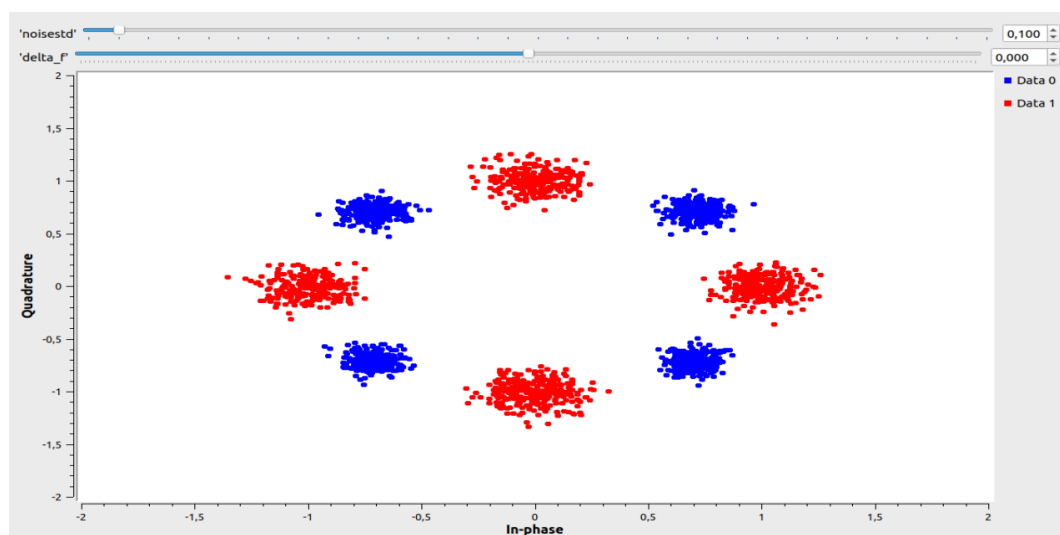
Nas Figuras 2 e 3, são apresentadas as respostas do sistema nas condições sem ruído e com ruído adicionado. Em vermelho, é mostrado o sinal após o DPSK concentrado no plano IQ na posição de 0°, 90°, 180° e 270°, e em azul, o sinal inicial em 45°, 135°, 225° e 315°.

Figura 2 – Constelação gerada na simulação DPSK sem a presença de ruído.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 3 – Constelação gerada na simulação DPSK com a presença de ruído com amplitude de 0,1 V.

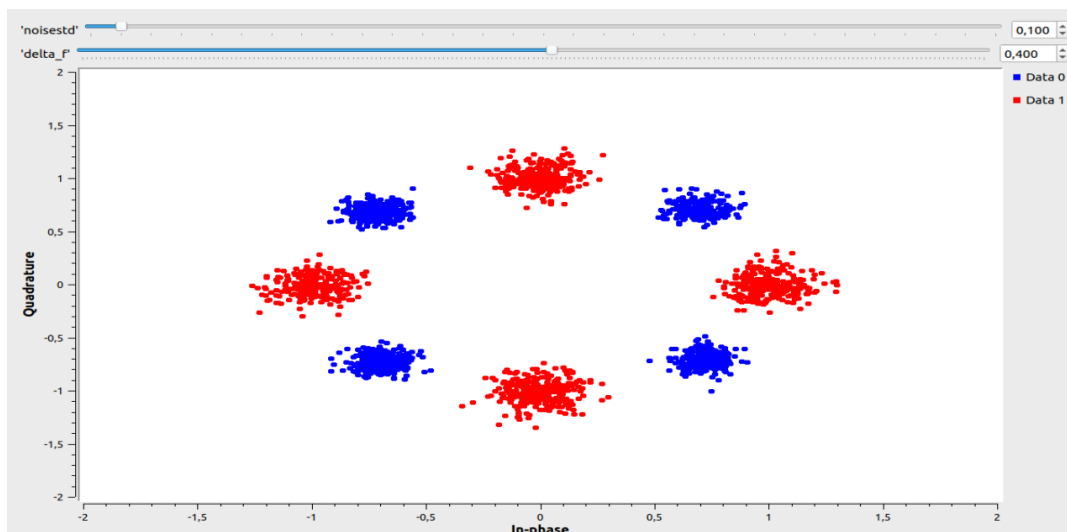


Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme ilustrado, observa-se que, mesmo com a adição de ruído, os pontos permanecem bem definidos e concentrados nas posições esperadas do plano IQ, mantendo-se como sinais perfeitamente distinguíveis. Isso demonstra a robustez da modulação diferencial frente a degradações do canal.

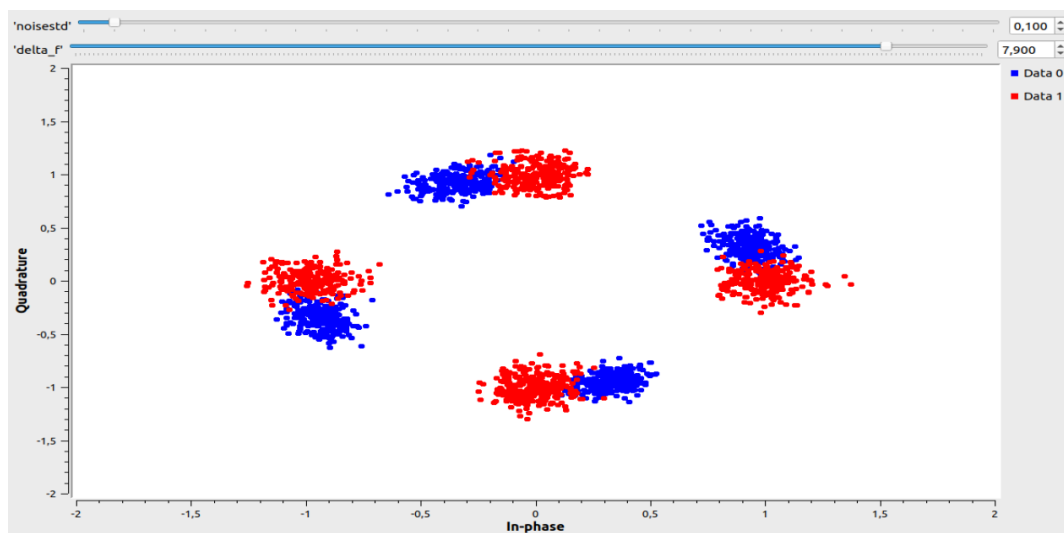
Outro aspecto analisado foi a influência dos desvios de frequência da portadora. Esse desvio foi implementado por meio do bloco *QT GUI Range* em uma variável chamada *delta_f*, que permitiu valores entre -10 e 10 com um passo de 0,1, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5. Essas figuras mostram a resposta do sistema para valores pequenos e elevados de *delta_f*.

Figura 4 – Constelação gerada na simulação DPSK com deslocamento de frequência pequeno.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 5 – Constelação gerada na simulação DPSK com deslocamento de frequência elevado.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Observa-se que a modulação DPSK consegue manter a integridade dos símbolos transmitidos mesmo na ausência de um laço de recuperação de portadora. Com delta_f pequeno, há apenas uma leve dispersão dos pontos no plano IQ, sem impacto significativo na interpretação dos símbolos. Já com delta_f elevado, ocorre uma rotação mais acentuada da constelação e uma sobreposição entre os clusters de símbolos consecutivos, resultado da defasagem cumulativa introduzida.

Apesar disso, a estrutura da constelação permanece reconhecível, evidenciando a robustez da modulação diferencial frente a desvios de frequência. Isso ocorre porque as decisões são baseadas nas diferenças de fase entre símbolos, e não em fases absolutas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentada a implementação de uma modulação diferencial por deslocamento de fase (DPSK) utilizando a ferramenta de desenvolvimento de código aberto *GNU Radio*. Por meio da configuração desenvolvida e dos experimentos realizados, foi possível analisar o comportamento do sistema DPSK a partir da representação em constelação, observando tanto situações ideais quanto os efeitos da adição de ruído e desvios de frequência da portadora.

A visualização gráfica da constelação permitiu compreender como os símbolos são representados e como o sistema responde a diferentes condições do canal. Mesmo sem a presença de um laço de recuperação de portadora, a modulação diferencial mostrou-se robusta, mantendo a estrutura dos símbolos reconhecível mesmo em cenários com ruído ou variações de frequência.

Os experimentos propostos contribuem significativamente para o processo de ensino-aprendizagem em disciplinas como sinais e sistemas, processamento de sinais e comunicações, ao proporcionar uma abordagem prática e interativa para o estudo da modulação digital. Como continuidade do trabalho, planeja-se aplicar as práticas em ambiente de sala de aula, com o objetivo de aprimorar a compreensão e a retenção dos conteúdos pelos alunos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, do Campus João Pessoa, e ao PETEE-IFPB (Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba), pelo apoio técnico e financeiro.

REFERÊNCIAS

ALMALEH, R. H. **Avaliação do rádio definido por software LimeSDR utilizando a plataforma GNURadio**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/198345>. Acesso em: 06 jun. 24.

ALMEIDA, T. P. **A utilização de rádios definidos por software, técnicas de aprendizado de máquina e ferramentas de acesso remoto no aprimoramento dos laboratórios de telecomunicações**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de Brasília, Brasília. 2021

About GNU Radio · GNU Radio. Disponível em: <<https://www.gnuradio.org/about/>> Acesso em: 06 jun. 24.

BOMBAY, N. I. **Week 08: Lecture 40**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=UBLRpfWeoq4&list=PL0zRYVm0a65fPsbm_Uzs2fL_V7To6l6HL&index=40>. Acesso em: 29 abr. 2025.

COURSES.WASHINGTON.EDU. Laboratory exercises for digital communications. Department of Electrical Engineering, University of Washington. Disponível em: <<https://courses.washington.edu/>>. Acesso em: 06 jun. 2024.

DINIZ, P. C. A. **Utilização de rádio definido por software para análise de sinais aplicados ao ensino em engenharia**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

DINIZ, P. C. A. **Utilização de rádio definido por software e metodologias ativas no ensino em engenharia elétrica**. 2019. Doutorado em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Elétrica Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2022.

GOMES, E. C.; BATISTA, M. C.; FUSINATO, P. A. **O Uso Das Metodologias Ativas Nos Cursos De Engenharia No Brasil A Partir De Teses E Dissertações**. Revista Valore, v. 6, p. 471-483, 2021.

PONCIANO, T. M.; GOMES, F. C. de V.; MORAIS, I. C. **Metodologia ativa na engenharia: verificação da abp em uma disciplina de engenharia de produção e um modelo passo a passo**. 2017.

PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Digital Communications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

RAPPAPORT, T. S.; XING, Y.; KANHERE, O. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges. *IEEE Access*, v. 10, p. 143-171, 2022.

SILVA, H. O. L. **Protótipos de sistemas comerciais em rádio definido por software para fins didáticos no curso de Engenharia de Telecomunicações**. 2022. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) - Departamento de Engenharia de Comunicações, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

GNU RADIO: APPLICATION OF SOFTWARE-DEFINED RADIO IN PRACTICAL TEACHING OF DPSK MODULATION

Abstract: *The use of GNU Radio as an educational platform enables practical and dynamic teaching of Differential Phase-Shift Keying (DPSK) modulation in Telecommunications Engineering courses. By integrating active learning methodologies and Software-Defined Radio (SDR) technologies, students can explore real-world communication scenarios, adjusting parameters such as noise levels and carrier frequency offsets. The developed simulation environment allows the visualization and analysis of DPSK constellations, highlighting the modulation's robustness against channel degradations and frequency instabilities. Results demonstrate that DPSK maintains symbol integrity without requiring carrier recovery, reinforcing its applicability in adverse conditions. This approach enhances student engagement, consolidates theoretical knowledge through experimentation, and supports the modernization of engineering education.*

Keywords: *GNU Radio, DPSK modulation, Software-Defined Radio, active learning, digital communications.*

