

# Um Estudo Comparativo de Modulações Empregadas na Comunicação por CubeSats

Daniel Trevisan Tatsch  
Jessica de Souza  
João Vitor Rodrigues  
Katharine Schaeffer Fertig  
Krithine Schaeffer Fertig  
Pedro Henrique da Silva Hames  
Vitor Manoel da Silveira

*Engenharia de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina*

<danielt.tatsch@gmail.com> <jessica.souzajds@gmail.com>  
<joao.vitor.rodrigues.tele@gmail.com> <kathfertig@gmail.com>  
<krisfertig@gmail.com> <pedro.hamess@gmail.com>  
<vitormsilveira95@gmail.com>

15 de dezembro de 2018

**Resumo-** *O presente artigo objetiva realizar uma revisão bibliográfica sobre a comparação de tipos de modulação atualmente utilizados na comunicação entre tecnologias de CubeSats e pequenos satélites. O documento conta ainda como avaliação para a disciplina de Sistemas de Telecomunicações do curso de Engenharia de Telecomunicações do IFSC - Campus São José, ministrado durante o semestre 2018.2 pelos professores Ramon Mayor Martins, Clayrton Monteiro Henrique e Rubem Toledo Bergamo.*

**Palavras-chave:** CubeSats. Comunicação. Satélites. Modulações. ASK. PSK. FSK.

## 1 Introdução

Segundo Kleinschrodt et al. (2017) alguns aspectos entre os enlaces de estações base e satélites são fundamentais para o entendimento e funcionamento de comunicação entre pequenos satélites. Dentre estes aspectos, destacam-se o hardware de radio, tipos de modulação e protocolos de comunicação empregados.

Com o aumento das capacidades de operação de pequenos satélites, surge um aumento dos requisitos para se alcançar tais capacidades. Por este motivo acompanha-se a necessidade de emprego de tipos de modulação avançados de forma a aprimorar a vazão nas faixas de frequência disponíveis para comunicação de pequenos satélites (KLEINSCHRODT et al., 2017).

De acordo com Kleinschrodt et al. (2017), além destes requisitos, enlaces de satélite também sofrem com a mudança de suas características, devido à mudança de distância, distúrbios atmosféricos e erros pontuais. Nestes casos, a modulação

adaptativa também contribui na melhora de robustez e eficiência dos sistemas de comunicação.

Neste trabalho será abordado então este aspecto, i.e, o emprego de tipos de modulação digital na comunicação entre pequenos satélites, mais especificamente CubeSats, visando a sua comparação para o aperfeiçoamento das características e capacidade dos pequenos satélites.

## 2 CubeSats

O CubeSat, plataforma classificada como pequeno satélite, originou-se em 1999 nos EUA, sendo posteriormente desenvolvido por diferentes países, como Rússia e Alemanha. É um sistema de energia e capacidade limitada, originalmente concebido para capacitar estudantes de pós-graduação a projetar, construir, testar e operar pequenos satélites no espaço (HERRERA, 2014).

Embora os CubeSats tenham sido historicamente usados como ferramentas de ensino e demonstrações de tecnologia, recentes projetos, conforme Schaire et al. (2016), mostram que estes pequenos satélites podem realizar e auxiliar em metas significativas de pesquisas e ciências da Terra e do espaço. Atualmente, os satélites CubeSats são amplamente utilizados em ciência e educação, sendo ferramentas promissoras para pesquisa e comunicação espacial.

As principais vantagens dos CubeSats são o seu baixo custo de projeto, devido a grande comunidade engajada nos projetos e missões com pequenos satélites. Esse fenômeno, de acordo com Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017), permite compartilhar processos de construção entre pequenos grupos de engenharia que podem reduzir custos e o tempo necessário para produção. Além disso, o pequeno tamanho do CubeSats permite o uso de muitos satélites, o que torna possível usar algoritmos para comunicações distribuídas.

Porém, ainda segundo Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017), restrições de peso e tamanho apresentam-se como sérios desafios no uso de CubeSats e sua capacidade, já que a relação sinal-ruído nestes equipamentos não pode ser simplesmente melhorada com o aumento da potência. Isso leva também a outra questão de limitação dos CubeSats, que é o seu consumo energético. Uma das principais maneiras de melhorar a capacidade e a taxa de processamento destes pequenos satélites é o uso apropriado de modulações e esquemas de codificação. (GAYSIN; FADEEV; HENNHÖFER, 2017).

Diversos projetos de CubeSats são desenvolvidos apenas com objetivos científicos, com baixos requisitos referentes à taxa de dados e por isso usam técnicas de modulação básicas e simples. Porém, deve-se considerar que para maiores capacidades e maior largura de banda, outras técnicas de modulação eficientes e suas demais combinações devem ser também avaliadas e aplicadas (GAYSIN; FADEEV; HENNHÖFER, 2017).

## 3 Tipos de Modulação Digital

Sinais de banda base podem ser modulados no sinal de uma chamada portadora alterando-se uma ou mais de suas características de amplitude, frequência e fase (KLEINSCHRODT et al., 2017).

De forma a alterar estas características básicas do sinal, a modulação pode ser analógica ou digital. Segundo Herrera (2014) o objetivo da modulação digital está na transferência de *streams* digitais de bit sobre um canal analógico de modo a alterar as características do sinal modulado. Em geral, as principais técnicas de modulação digitais são baseadas em chaveamento (*keying*).

Na categoria de modulações digitais, para transmissões de curta distância, as modulações de banda base são geralmente usadas. Mas tratando-se de transmissões sem fio e de longas distâncias, como o caso de comunicações por satélite, são empregadas as modulações da banda passante em sinais de alta frequência, chamadas também de modulações de portadora (*bandpass modulation*) (XIONG, 2006).

Dentre as principais técnicas de modulação digital de banda passante, estão a modulação de amplitude (ASK - *Amplitude Shift Keying*), modulação de frequência (FSK - *Frequency Shift Keying*) e modulação de fase (PSK - *Phase Shift Keying*). Com base nas combinações destas três técnicas básicas, uma variedade de esquemas de modulação pode ser derivada (KLEINSCHRODT et al., 2017).

Segundo Herrera (2014), a escolha do tipo de modulação utilizada em um sistema de comunicação impacta diretamente em sua capacidade, que é expressada pela eficiência espectral, dada em bits por segundo por Hertz (bits/s/Hz). De forma geral, a escolha da técnica de modulação utilizada está relacionada com as seguintes características:

- Eficiência espectral (*bandwidth efficiency*): relaciona a quantidade de bits por segundo que o sistema será capaz de transmitir com a quantidade de banda utilizada. Assim, quanto maior a ordem da modulação utilizada, maior a eficiência espectral, ou ainda, mais bits por segundo são transmitidos com a mesma porção do espectro.
- Eficiência de potência (*high power efficiency*): é contrária à eficiência espectral, pois quanto maior a ordem da modulação utilizada, mais precisa e linear deve ser a resposta em frequência dos circuitos de amplificação. Isso se dá em virtude dos requisitos de EVM (*error vector magnitude*) de cada modulação.
- Baixa interferência co-canal (*Low carrier to co-channel and out of band radiation*): está relacionada com a robustez da técnica utilizada no que se refere aos sinais adjacentes no espectro.
- Robustez contra multipercursos (*Low sensitivity to multipath*).

Xiong (2006) afirma ainda que a complexidade do sistema, que se refere à quantidade de circuitos envolvidos e à dificuldade técnica do mesmo, conta como um dos principais critérios na escolha de um esquema de modulação. Por exemplo, o projeto de um circuito demodulador é normalmente mais complexo que o modulador. Mais específico ainda: um demodulador coerente é muito mais complexo do que um demodulador não-coerente, pois necessita recuperar informação da portadora.

Além disso, a escolha da técnica de modulação tem um impacto direto na capacidade de um sistema de comunicação digital. Ele determina a eficiência de banda de um único canal físico (HERRERA, 2014).

Porém, partindo-se do ponto de que há conhecimento dos tipos e características das modulações disponíveis, a escolha do esquema mais adequado para a aplicação de comunicação via satélite torna-se mais assertiva. Nas seções a seguir, são apresentados os tipos de modulação que servem de base para este trabalho:

### 3.1 ASK

A modulação ASK se trata da alteração do parâmetro de amplitude de um sinal de portadora e é a maneira mais fundamental de modular informações dentro de um sinal. Dentro desta categoria de modulação, destaca-se o padrão OOK (*On-Off Keying*), onde o sinal da portadora é ligado e desligado de forma a transmitir um símbolo binário (KLEINSCHRODT et al., 2017).

### 3.2 FSK

A modulação FSK altera a característica de frequência de um sinal. O tipo de modulação por frequência mais básico é o BFSK (*Binary Frequency Shift Keying*), o qual utiliza de um par de frequências discretas para transmitir informações binárias. Outra variante do FSK é o MSK (*Minimum Shift Keying*), também conhecida como FFSK (*Fast Frequency Shift Keying*) (KLEINSCHRODT et al., 2017). A troca entre frequências ocorre quando o sinal está em nível zero no momento da oscilação da modulação.

Ainda segundo Kleinschrodt et al. (2017), uma variante do MSK, comumente empregada em sistemas celulares (incluindo GSM) e aplicável em sistemas de radio-comunicação, é o GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Este se difere do MSK ao filtrar o sinal por um filtro Gaussiano antes do mesmo ser modulado.

### 3.3 PSK

A última categoria de modulação é a por fase, a qual desloca a fase da portadora baseado na informação binária a se transmitir.

Sua forma mais simples é a BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), a qual inverte a fase do sinal portadora (em  $180^\circ$ ) a cada mudança de estado binário transmitido. Porém, é possível combinar diferentes modulações, a fim de obter um esquema com características de eficiência melhores.

Por exemplo, ao combinar a modulação BPSK com portadoras ortogonais, um novo esquema chamado de chaveamento por quadratura de fase, ou QPSK (*Quadruple Phase Shift Keying*), pode ser gerado. Esta é outra variante muito popular do PSK, a qual se baseia não apenas em um bit para alteração da fase de um sinal, mas sim na combinação de 2 bits (KLEINSCHRODT et al., 2017). Desta forma o QPSK permite carregar o dobro de informação em relação ao PSK básico, usando a mesma largura de banda.

Dentre também outras combinações, ao modular a amplitude e a fase, obtém-se um esquema chamado modulação de amplitude em quadratura (QAM), e assim por diante.

## 4 Comparação das Principais Modulações

Em comunicações por satélites, e principalmente em missões com uso de Cube-Sats, a energia é um fator muito importante do sistema. Um pequeno satélite possui, por exemplo, limitações físicas quanto ao número e tamanho de baterias de lítio e placas solares acopladas. As restrições de energia CC são críticas quanto à operação de um transceptor CubeSat (CLARK et al., 2009). Tais requisitos de energia são definidos e limitados principalmente pelo amplificador de potência de transmissão (PA), que deve atingir sua máxima eficiência.

Para isso, o ideal é a escolha de esquemas de modulações enquadrados na categoria de envoltória constante (*constant envelop*)(XIONG, 2006). Estes esquemas de modulação permitem a operação saturada do PA com baixo consumo de energia. Conforme aplicado em Clark et al. (2009), a modulação FSK é dessa forma escolhida por possuir tal propriedade e se encaixar muito bem neste requisito de consumo de energia.

Os sistemas de rádio convencionais presentes nos CubeSats utilizam variações de diversas modulações básicas, tais como: AFSK, GMSK, BPSK, QPSK e OOK. Estas modulações podem também alternar entre si de acordo com a demanda em que cada uma se faz mais efetiva. Elas representam um equilíbrio entre as eficiências energética e espectral em modulações de ordens elevadas do M-FSK e M-QAM,

respectivamente. Infelizmente não é possível focar apenas no consumo energético devido aos limites da faixa de frequência ocupada (VERTÁT; MRAZ, 2013).

A modulação FSK, de acordo com Herrera (2014), tem a vantagem de simples geração e demodulação, e como já citado anteriormente, permite a utilização de um amplificador de potência não linear devido a sua característica de amplitude constante. No entanto, são visíveis algumas desvantagens significativas, como o baixo desempenho do BER e a baixa eficiência espectral, principalmente em comparação com os esquemas de PSK. Segundo Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017), mesmo a utilização de FSK de ordem 4 não apresenta melhores resultados em comparação com o então esquema PSK.

Tratando-se dos esquemas PSK, incluindo BPSK, QPSK, OQPSK e MSK, estes são amplamente utilizados em transceptores de sistemas de comunicação via satélite (XIONG, 2006). O emprego das modulações MSK e FSK é realizado, em casos específicos, devido ao fato de que protocolos de comunicação muito utilizados em comunicação de pequenos satélites, como AX.25 e TNCs, possuem suporte a estas modulações (KLEINSCHRODT et al., 2017).

Segundo Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017), o esquema MSK obtém um uso mais eficiente do espectro em comparação com o QPSK. No entanto, deve-se atentar aos resultados de taxa de erros de bit do mesmo, que apresentam-se piores. Herrera (2014) concorda também com Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017) na utilização do MSK como um esquema bem promissor. A principal desvantagem é que somente esquemas com pré-codificação (como PMSK) atingem a mesma taxa de erro de bit (BER) teórico de modulações de maior ordem, como o QPSK.

Herrera (2014) também destaca a modulação QPSK como alternativa, assim como (GAYSIN; FADEEV; HENNHÖFER, 2017), que investe na abordagem do uso desta modulação adaptativa. Também conhecido como 4-PSK ou 4-QAM, o QPSK é uma implementação de modulação PSK de maior ordem, estando abaixo apenas do esquema de modulação 8-PSK (PSK de máxima ordem). O QPSK transmite o dobro da taxa de dados em uma determinada largura de banda em comparação com o BPSK. Ambos os esquemas de modulação (QPSK e BPSK) possuem ainda a mesma probabilidade de erro de bit, o BER. Porém, para garantir tal desempenho, o QPSK necessita do dobro de potência.

De acordo com os estudos de Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017) os esquemas QPSK e 4-QAM são comparados primeiramente devido à suas constelações e valores de BER similares. A modulação  $\pi/4$ -QPSK rotacionada possui também a mesma constelação do 4-QAM, mas apresenta-se melhor que o clássico QPSK, pois o sinal não apresenta cruzamentos em zero. Porém, devido a possibilidade de saltos de fase de 180 graus, isso implica negativamente nas características espectrais do sinal. Uma forma de evitar tal problema é o uso do esquema OQPSK (Offset QPSK), não ocorrendo também distorções na envoltória do sinal, além de que os esquemas QPSK e OQPSK possuem os mesmos valores de BER.

Conforme Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017), as modulações P/4-QPSK, OQPSK e GMSK em conjunto com diferentes esquemas de codificação possuem muitas vantagens se considerados em termos de taxa BER e parâmetros espectrais. Porém, de acordo com Kleinschrodt et al. (2017), comparando-se os principais protocolos de comunicação difundidos na comunicação entre pequenos satélites, testes mostraram que os protocolos que empregavam a modulação GMSK apresentaram melhor desempenho.

A modulação GMSK, é ainda segundo Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017), uma boa forma de melhorar as características espectrais do sinal. É também classificada como uma modulação de envoltória constante, possibilitando assim a operação saturada de amplificadores. Neste esquema de modulação, a característica de frequência instantânea é suavizada ao aplicar um filtro passa-baixa gaussiano, produzindo um

sinal com excelente contenção espectral. Os filtros gaussianos permitem obter um ganho espectral significativo em comparação com a modulação MSK e PSK, possuindo porém um menor desempenho de BER. Além disso, permite ter a mesma taxa de transferência que o esquema OQPSK.

De acordo com Herrera (2014), um sinal aplicado à uma modulação GMSK pode ser amplificado por um amplificador não-linear e ainda permanecer sem distorções, sendo essa uma característica de particular importância ao utilizar transmissores portáteis e pequenos, como aqueles requeridos em sistemas de comunicações móveis. O consumo de energia para uma dada saída é muito menor, sendo imune a variações de amplitude e, dessa forma, mais resistente à ruídos.

Segundo simulações apresentadas por Herrera (2014), na análise das modulações QPSK, 8PSK e GMSK, o modelo de melhor desempenho apresentado foi dado pelo uso do GMSK. Em segundo, o esquema QPSK, sendo mais robusto contra erros de canal. Por último apresenta-se a modulação 8PSK. Em relação à eficiência de potência, esta mostrou-se adequada em ambos os esquemas de modulações. Contudo, apresentou-se pior no caso do GMSK. Em resumo, conforme os resultados das simulações, a modulação que possui melhor resultado em BER e eficiência de banda é o QPSK com aplicação de codificação convolucional. Ainda segundo Herrera (2014), a escolha desta modulação não afetaria negativamente a distribuição de energia do CubeSat e aumentaria significativamente a taxa de bits do enlace. No caso do QPSK, a taxa de dados seria o dobro se comparada com a modulação BPSK, apenas porque o QPSK é 2 vezes mais eficiente em termos de frequência do que o BPSK.

De forma semelhante, Gaysin, Fadeev e Hennhöfer (2017) aponta a modulação OQPSK como a mais apropriada para CubeSats devido ao seu bom desempenho em relação ao BER e eficiência de banda, não levando porém em consideração esquemas de modulações híbridos para a análise.

Além dos esquemas de modulações simples, uma maneira de se alcançar alta eficiência de banda é escolher uma modulação de alto nível. Porém, com isso apresentam-se algumas desvantagens: a redução da eficiência de potência; a variação da envolvente do sinal, causando interferência em canais adjacentes (HERRERA, 2014).

Por este motivo, segundo VEŘTÁT e Mraz (2013), outras técnicas de modulação podem ser empregadas, onde sinalizações antipodal e bi-ortogonal são aplicadas nas subportadoras do sinais para alcançar uma melhor utilização do espaço. Na sinalização antipodal um símbolo BPSK, por exemplo, pode ser incorporado entre dois símbolos da modulação M-FSK. Na sinalização bi-ortogonal pode-se utilizar um símbolo QPSK ao invés do BPSK.

Conforme VEŘTÁT e Mraz (2013), esse processo de inserção de símbolos em outras modulações é chamado de modulação híbrida. Com o mesmo nível de sinal e largura de banda é possível obter taxas de transmissão mais elevadas, aumentando assim as eficiências espectral e energética em comparação à modulações convencionais.

#### **4.1 Modulações Híbridas**

De acordo com VEŘTÁT e Mraz (2013) modulações híbridas avançadas, como DM-FSK ou DQPSK, possuem uma codificação diferencial em relação à aplicada na M-FSK. Elas são muito utilizadas em canais com efeito Doppler, comunicação submarina, ou via satélites.

Estas modulações híbridas podem ser usadas em comunicação de sistemas de CubeSats com uma implementação adaptada, até mesmo sob as piores condições de link de satélite (como por exemplo elevação do ângulo de picosatélites abaixo de 10°).

Existe ainda a possibilidade de aumentar a eficiência espectral na comunicação entre CubeSats, bem como a eficiência energética da modulação M-FSK, através da

inserção de símbolos DQPSK a cada dois símbolos M-FSK (VEŘTÁT; MRAZ, 2013). Além desses dois fatores, esse tipo de modulação híbrida oferece propriedades adequadas para picosatélites, com ampla faixa de adaptação devido a mudança da ordem do M-FSK e uma resistência maior ao efeito Doppler através da codificação DMFSK.

De forma semelhante, um modulador híbrido foi realizado em software e proposto por VEŘTÁT e Mraz (2013), o qual teve como modulação os tipos 2-FSK até 1024-FSK e modulação DQPSK (como uma referência à modulação híbrida). Dos grupos de modulação híbrida, foram usados 2-FSK/DQPSK até 1024-FSK/DQPSK, e também D2-FSK/DQPSK até D1024-FSK/DQPSK. Como resultado, essas modulações híbridas aplicadas possuem melhor eficiência energética se comparadas com a modulação M-FSK com a mesma eficiência espectral. Este aumento significativo é notável para FSK de baixa ordem (VEŘTÁT; MRAZ, 2013).

Quando a largura de banda não é alcançada devido à baixa ordem de modulação M-FSK utilizada, então as modulações híbridas propostas oferecem um aumento de 50% de taxas de dados se comparados com a modulação M-FSK convencional devido à melhora na eficiência energética. Já quando a largura de banda está totalmente em uso, então a modulação híbrida melhora em 150% as taxas de dados devido à melhora na eficiência energética e também na eficiência espectral (VEŘTÁT; MRAZ, 2013).

Por fim, modulações híbridas possuem melhor desempenho devido à melhores eficiências espectral e energética, especialmente se comparadas com a modulação OOK, além de oferecer um sinal recebido contínuo e com qualidade.

## **4.2 Beacon de Onda Contínua (CW Beacon)**

Atualmente, segundo Vertat et al. (2013) têm-se comumente utilizado o código Morse com Beacon de onda contínua (CW com beacon) e modulação OOK (ASK) em picosatélites (especialmente CubeSats) para a sinalizações do mesmo e transmissões limitadas de telemetria sobre o correto funcionamento do picosatélite. O uso CW com beacon neste meio se dá devido a diversas vantagens das quais se destacam o simples processamento de sinais e a boa audibilidade humana das informações mesmo em um canal ruidoso.

Desta forma, atuais picosatélites CubeSats têm empregado o modo CW beacon para a radiotransmissão contínua ou periódica de telemetria básica e identificação dos próprios satélites. Este modo de transmissão em conjunto com código Morse e modulação OOK é ainda popularmente difundida na comunidade de radioamadorismo por sua fácil receptividade (VERTAT et al., 2013).

Outro emprego de CW com beacon em picosatélites está na transmissão de sinais de avaliação de qualidade dos mesmos aplicando-se código Morse e modulação OOK. A vantagem na aplicação desta modulação está na fácil detecção e alto ciclo de trabalho de atividade, permitindo a avaliação dos sinais de qualidade recebidos mesmo em condições de baixa elevação dos picosatélites (VERTAT et al., 2013).

No entanto, apesar de seu amplo uso neste cenário, a modulação OOK ou o código Morse aplicados ao modo de transmissão CW com beacon apresentam uma baixa eficiência energética e muitos espaços entre símbolos transmitidos. Este ponto tende a causar complicações para a correta recepção dos sinais de avaliação de qualidade, especialmente, em casos de sinais recebidos atenuados e ruidosos (VERTAT et al., 2013).

Desta forma, Vertat et al. (2013) destaca que para um futuro sistema de comunicação totalmente adaptável no emprego de picosatélites, se faz necessário a substituição do código Morse e modulação OOK em modo de transmissão CW com beacon para uma modulação com maior eficiência energética e sem espaços entre símbolos.

Por conseguinte, Vertat et al. (2013) aponta para a possível substituição do cenário atual para modulações híbridas de alta ordem como solução para eficiência energética.

tica em CubeSats e destaca a modulação híbrida 8-FSK/DQPSK, capaz de gerar uma alta economia de energia nos picosatélites sem alterar a vazão de dados transmitidos.

### 4.3 CubeSats com alta taxa de transmissão

Schaire et al. (2016) defende que em geral, a largura de banda é uma questão a se atentar em comunicação com picosatélites, devido a sua alteração causada por interferências. Apesar da largura de banda não ser a principal preocupação na maioria de missões científicas terrestres de CubeSats na banda X, destaca-se o uso de modulação de alta ordem (no mínimo entre 8 e 16) para permitir que mais missões coexistam sem sobreposição e interferência na comunicação. Desta forma ainda, pode-se aumentar o uso de regiões polares terrestres no estudo científico.

Schaire et al. (2016) também aponta que além da largura de banda na transmissão de sinais por CubeSat com alta taxa de transmissão, para se alcançar altas taxas se faz necessário maximizar a eficiência da potência RF. Assim, as modulações de alta ordem já citadas 8-PSK, apesar de não contribuírem amplamente para altas taxas em missões de CubeSat na banda X-band (canal de 375 MHz), podem aprimorar as taxas em missões operando na banda S (canal de 5 MHz).

Além do possível emprego da modulação 8-PSK, outras podem ser destacadas como OQPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*), 16-APSK (*Asymmetric Phase Shift Keying*), 32-APSK, 16-QAM. Estas têm sido estudadas com codificação 7/8 LDPC para se determinar a máxima taxa de transmissão possível de CubeSat operando na banda X com um canal de 10 MHz de largura de banda (SCHAIRE et al., 2016).

De acordo com Schaire et al. (2016), estas demais modulações de alta ordem são suscetíveis a distorções lineares e em especial não lineares dos transmissores. Tais transmissores de CubeSats necessitam então do emprego de rigorosas restrições de distorção de forma a permitir o uso de modulações de alta ordem. Dentre estas modulações, ao se comparar 16-APSK, 32-APSK e 16-QAM, a mais factível apresentada é a modulação 16-APSK. Ela apenas requer a presença de um amplificador de potência quase linear nos picosatélites, sendo que a ausência do mesmo, pode ser compensada através da aplicação de um mecanismo de pré-distorção (SCHAIRE et al., 2016).

## 5 Conclusão

Pôde-se concluir que uma das maneiras mais apropriadas para melhorar a capacidade e contornar limitações dos CubeSats é o uso de esquemas eficientes de modulação e conjuntamente, se possível, a aplicação de codificação. Desta forma, diferentes esquemas de modulação tem sido empregados na comunicação entre CubeSats como modulações simples, adaptativas, de alta ordem e híbridas, com o intuito de melhorar e balancear os requisitos de eficiência espectral e energética - dois importantes requisitos e restrições nos sistemas CubeSats.

Observou-se ainda que as modulações são empregadas em diversas aplicações específicas de CubeSat, atendendo suas demandas específicas como transmissão em altas taxas ou transmissão de sinais de qualidade e telemetria.

Pôde-se analisar que para modulações simples e de baixa ordem, as que mais se destacaram foram 8PSK, MSK e sua derivada GMSK, e QPSK. Contudo, conclui-se ainda que a aplicação de códigos, como codificação convolucional na modulação QPSK, aprimora ainda mais os resultados obtidos com cada modulação.

Verificou-se ainda que a aplicação de modulações híbridas tende a aprimorar ainda mais a eficiência espectral e energética de modulações satisfatórias como MSK.



As modulações híbridas DMFSK ou DQPSK contribuem altamente para eliminar as problemas causados pelo efeito Doppler e substituir modulações simples e com maior carga histórica como OOK e código Morse (ASK). Desta forma conclui-se que estes esquemas de modulações híbridas são as tendências aplicáveis e factíveis ao futuro dos sistemas de comunicação de picosatélites.

## Referências

CLARK, C. et al. Cubesat communications transceiver for increased data throughput. In: *2009 IEEE Aerospace conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 1095-323X.

GAYSIN, A.; FADEEV, V.; HENNHÖFER, M. Survey of modulation and coding schemes for application in cubesat systems. In: *IEEE. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, 2017. [S.l.], 2017. p. 1–7.

HERRERA, N. C. A case study on the communications subsystem for cubesat. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.

KLEINSCHRODT, A. et al. Advances in modulation and communication protocols for small satellite ground stations. In: . [S.l.: s.n.], 2017.

SCHAIRE, S. et al. Nasa near earth network (nen) and space network (sn) cubesat communications. In: *14th International Conference on Space Operations*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 2598.

VERTAT, I. et al. Hybrid modulation as beacon replacement in cubesat picosatellites. In: *IEEE. Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2013 23rd International Conference. [S.l.], 2013. p. 297–301.

VEŘTÁT, I.; MRAZ, J. Hybrid m-fsk/dqpsk modulations for cubesat picosatellites. *Radioengineering*, v. 22, n. 1, p. 389–393, 2013.

XIONG, F. *Digital Modulation Techniques*. Artech House, Inc, 2006. v. 2nd ed. (Artech House Telecommunications Library, v. 2nd ed). ISBN 9781580538633. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=189837&lang=pt-br&site=ehost-live>>.