

MELHORIA DA EFICIÊNCIA DE COMUNICAÇÕES HF UTILIZANDO ALGORITMOS DE SELEÇÃO DE DÉBITO BINÁRIO EVOLUIDOS¹

IMPROVING HF COMMUNICATIONS EFFICIENCY USING EVOLVED DATA RATE CHANGE ALGORITHMS

Vasco Ferreira Sequeira

Tenente de Transmissões
Mestre em Engenharia Eletrotécnica Militar, especialidade de Transmissões, pela Academia Militar
Comandante do Pelotão de Sistemas de Área Local, da Companhia de Transmissões, da Brigada Mecanizada
Equipa de Apoio em Engenharia do Projeto Sistemas de Informação e Comunicações - Tático
2770-025 Paço de Arcos
sequeira.vf@mail.exercito.pt

Maria Paula dos Santos Queluz Rodrigues

Professor Auxiliar no Instituto Superior Técnico
Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Université Catholique de Louvain, Bélgica
Instituto de Telecomunicações
1049-001 Lisboa
paula.queluz@lx.it.pt

António José Castelo Branco Rodrigues

Professor Auxiliar no Instituto Superior Técnico
Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores pela Université Catholique de Louvain, Bélgica
Instituto de Telecomunicações
1049-001 Lisboa
ar@lx.it.pt

José Eduardo Charters Ribeiro da Cunha Sanguino

Professor Auxiliar no Instituto Superior Técnico
Doutorado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, pelo Instituto Superior Técnico
Instituto de Telecomunicações
1049-001 Lisboa
sanguino@lx.it.pt

Pedro Miguel Martins Grifo

Major de Transmissões
Mestre em Engenharia Eletrotécnica Militar, especialidade de Transmissões, pela Academia Militar
Oficial Adjunto do Gabinete de Planeamento e Coordenação de Projetos
Equipa de Apoio em Engenharia do Projeto Sistemas de Informação e Comunicações - Tático
2770-025 Paço de Arcos
grifo.pmm@mail.exercito.pt

Como citar este artigo: Sequeira, V., Rodrigues, M., Rodrigues, A., Sanguino, J. e Grifo, P., 2018. Melhoria da Eficiência de Comunicações HF Utilizando Algoritmos de Seleção de Débito Binário Evoluídos. *Revista de Ciências Militares*, novembro, VI(2), pp. 207-231.
Disponível em: <https://www.ium.pt/cisdi/index.php/pt/publicacoes/revista-de-ciencias-militares>.

¹ O conteúdo deste artigo foi parcialmente apresentado na *International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS 2018)*, em Varsóvia, Polónia, e decorreu do trabalho de uma dissertação de mestrado desenvolvida na Academia Militar e Instituto Superior Técnico, em Novembro de 2017.

Resumo

As comunicações na banda das altas frequências (HF) têm evoluído tecnologicamente, desde o final dos anos 80, sendo esta evolução motivada pela potencial robustez desta forma de comunicação em situações de catástrofe e de emergência, e pelo custo de manutenção e implementação das comunicações via satélite. Apesar do reaparecimento do interesse nas comunicações HF, existem vários desafios envolvidos, como a operação rádio com relações sinal-ruído (SNR) tipicamente muito baixas e variação do sinal devido a mudanças frequentes na camada da Ionosfera. Para lidar com as variações do canal em HF, surgiram várias tecnologias como os algoritmos de seleção automática do débito binário (DRC). As soluções existentes (*Trinder* e *RapidM*) foram estudadas, e com base nas vulnerabilidades detetadas, foram propostas versões melhoradas de ambos os algoritmos: *Avoiding Cut-Off State* (ACOS) e *Bit Error Optimization* (BEO). A primeira proposta reduz o número de ocorrências de corte na ligação (correspondente a taxas de erro de bit superiores a 10^{-3}) e a segunda aumenta a disponibilidade da ligação e elimina as oscilações de débito binário. Quando comparadas com as versões originais, ambas as propostas demonstram melhores desempenhos, seja num sistema de simulação ou em condições reais de propagação.

Palavras-Chave: Algoritmos de Seleção de Débito Binário; Comunicações em HF; Comunicações via Ionosfera; Comunicações via Satélite.

Abstract

High frequency (HF) band communications have undergone a remarkable technologic evolution, since the 80s, motivated by their potential robustness to catastrophic and emergency situations, and by the high costs involved in implementing and maintaining satellite links. Despite the renewed interest on HF communications, there are a lot of challenges involved, like the operation with very low signal-to-noise ratios (SNR) and signal variation due to the frequent changes in the Ionosphere constitution. In order to deal with the variability of the HF channel, several technologies have emerged like the Data Rate Change (DRC) algorithms. Former DRC algorithms solutions were studied (Trinder and RapidM), and based on their vulnerabilities, improved versions were proposed for both algorithms: Avoiding Cut-Off State (ACOS) and Bit Error Optimization (BEO). The first proposal reduces the occurrences of link cut-offs (corresponding to bit error rates higher than 10^{-3}), and the second increases the link availability and eliminates data rate oscillations. When compared to the original versions of the algorithms, both proposals showed significant performance improvements, either when evaluated in a simulation environment, or in real field propagation tests.

Keywords: Data Rate Change Algorithms; HF Communications; Ionosphere Communications; Satellite Communications.

Introdução

Na situação nacional atual, nomeadamente nas Forças Armadas, em que se exige o cumprimento da missão com contenção de recursos, surgem novas soluções nas comunicações militares. Desenvolvimentos científicos de tecnologias primordiais que garantem o normal funcionamento com um baixo custo de instalação e manutenção foram estudados. Esta necessidade fomentou a aplicação das ondas rádio de alta frequência (HF- *High Frequency*) em Teatros de Operação (TO) que apresentam uma orografia de terreno acidentado, permitindo estabelecer comunicações rádio sem recurso a repetidores ou satélites (Ceita, 2014, p. 1), utilizando a Ionosfera como meio refletor das ondas rádio, diminuindo drasticamente os custos económicos, uma vez que só são necessárias duas estações, cada uma equipada com rádio e antena. No caso das missões de paz em que Portugal esteve inserido, no âmbito da Organização das Nações Unidas (ONU), *North Atlantic Treaty Organization* (NATO) e *European Rapid Operational Force* (EUFOR), designadamente nas missões da *Stabilization Force* (SFOR) e *Operation Joint Endeavour* (IFOR) na Bósnia-Herzegovina (1997), EUFOR Congo (2006) e *Kosovo Force* (KFOR) no Kosovo (2011), foram utilizadas comunicações HF (Gonçalves, 2013 cit. por Rocha, 2013, p. 3).

Antes dos anos 60, as transmissões HF eram a fonte primária de comunicações de longo alcance, mas derivado do aparecimento das comunicações via satélite que permitem maiores débitos binários, a sua evolução tecnológica entrou em declínio. No entanto, as comunicações via satélite apresentam custos elevados de produção, instalação e manutenção (tendo em conta o seu tempo de vida estimado), que teve como consequência o reaparecimento do desenvolvimento científico e uso das comunicações HF, no início do novo milénio. Apesar do reaparecimento do interesse em comunicações HF, particularmente em cenários de catástrofe ou de emergência, existem vários desafios envolvidos, como a operação rádio com relações sinal-ruído² (SNR) tipicamente muito baixas, desvanecimento (*fading*), variação do sinal devido a mudanças na camada da Ionosfera e a capacidade limitada do canal. Para lidar com as mudanças do canal em HF surgiram várias tecnologias, como a análise automática da qualidade da ligação (LQA), o estabelecimento automático da ligação (ALE) e algoritmos de mudança automática do débito binário³ (DRC), eliminando a necessidade de procedimentos operacionais complexos e manuais (Sequeira et al., 2017). Deste modo, surge a questão central deste artigo: ***De que forma se pode otimizar as comunicações HF apresentando melhores resultados que as soluções atuais?***

Este texto está organizado na seguinte estrutura: a Secção 1 estende o enquadramento das comunicações HF, descrevendo o seu funcionamento e as suas potencialidades e vulnerabilidades. Na Secção 2 descreve-se as comunicações via satélite, justificando porque a investigação das comunicações HF é importante, devido às fraquezas das comunicações via satélite. A Secção 3 aborda as soluções existentes de otimização da comunicação, apresentando o estado-de-arte dos algoritmos DRC. A Secção 4 apresenta o sistema de

² Relação Sinal-Ruído (dB) – Define-se como a razão entre a potência do sinal e a potência do ruído.

³ Débito Binário (bit/s) – Define-se como o número de bits transmitidos por unidade de tempo.

simulação desenvolvido para avaliar os algoritmos DRC e as propostas desenvolvidas para melhorar o desempenho das comunicações HF. A Secção 5 descreve os testes de propagação em condições reais, realizados entre Lisboa e Porto, e apresenta os resultados obtidos. Finalmente, são apresentadas as conclusões finais do trabalho, de forma a responder à questão central.

1. As Comunicações HF

Nas comunicações rádio são utilizados, normalmente, três tipos de sinal classificados segundo o espectro eletromagnético: sinais HF, sinais VHF (*Very High Frequency*) e sinais UHF (*Ultra High Frequency*). A banda HF situa-se entre os 3 MHz e os 30 MHz, com comprimentos de onda entre os 100 m e os 10 m, permitindo transmissões de dados e voz a longas distâncias utilizando as camadas da Ionosfera como refletores naturais. A banda HF é uma das mais importantes nas comunicações militares, e pode ser usada em navios, aeronaves, viaturas de combate e soldados apeados no terreno para comunicações sem linha de vista, bem como por Postos de Comando, quando a força está destacada no exterior (Johnson et al., 2013). A Figura 1 demonstra a divisão do espectro eletromagnético e as aplicações para cada tipo de sinal.

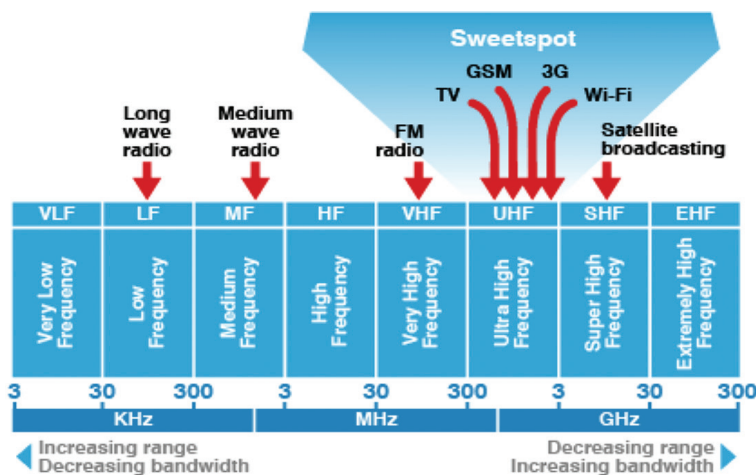


Figura 1 – Espectro Eletromagnético

Fonte: Disponível em <http://sciencepole.com/radio-spectrum/#> (consultado em 08OCT16).

1.1. A Camada da Ionosfera

A Ionosfera é uma camada da atmosfera composta por um plasma frio, ionizado pela radiação ultravioleta (UV) proveniente do Sol, e situa-se entre os 50 km e os 600 km de altitude em relação à superfície da Terra (Sequeira, 2017, p. 6). Durante períodos de grande atividade solar, os raios UV e outras radiações cósmicas afetam a composição da Ionosfera e a sua interação com as ondas eletromagnéticas. Desse modo, é necessário descobrir constantemente a frequência ótima de comunicação, a qual pode ser alcançada através

do estudo do modelo ionosférico. Este modelo é uma descrição matemática em função da localização⁴, altitude, período do ano⁵, fase do ciclo solar⁶ e atividade geomagnética. O estado do plasma ionosférico pode ser descrito por quatro parâmetros: densidade eletrônica, temperatura do eletrão, temperatura do ião e composição iônica. A propagação das ondas rádio depende unicamente da densidade eletrônica (Sequeira, 2017, p. 6). Um dos modelos ionosféricos mais usados é o *International Reference Ionosphere* (Bilitza, 2001), o qual divide a Ionosfera em quatro camadas (ou cinco, se a camada E_s esporádica também for considerada), baseado principalmente na densidade eletrônica (Hargreaves, 1995). Estas camadas, representadas na Figura 2, são:

- **Camada D:** começa nos 50 km de altitude e termina nos 90 km, sendo a mais próxima da superfície terrestre. Esta camada provoca atenuação nas ondas rádio (as baixas frequências são mais atenuadas que as altas), e apenas a ionização pesada resulta na absorção de ondas HF.
- **Camada E:** situada entre os 90 km e os 140 km de distância à superfície da Terra. Os sinais rádio HF são refletidos de volta à Terra nesta camada.
- **Camada F:** esta camada é dividida na **subcamada F₁**, situada entre os 140 km e os 300 km, e a **subcamada F₂**, situada entre os 300km e os 600km em relação à superfície terrestre. A maioria das formas de propagação de ondas utiliza as propriedades normais e cíclicas desta camada. Durante o dia a camada é dupla, durante a noite as subcamadas fundem-se, ficando apenas uma camada F.

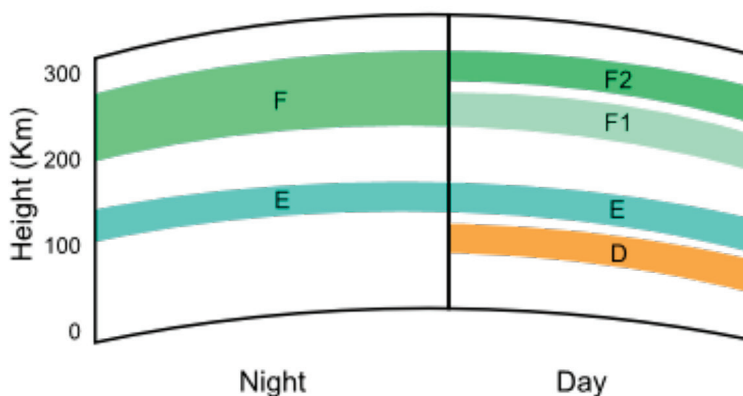


Figura 2 – Estrutura da Camada da Ionosfera

Fonte: Adaptado de <https://en.wikipedia.org/wiki/Ionosphere> (consultado em 21DEC16).

⁴ A composição da Ionosfera diverge nas diferentes partes do planeta. Nos polos da Terra, a Ionosfera é menos ionizada em comparação à linha do Equador, uma vez que tem menos exposição aos raios solares. Logo, nos polos as frequências ótimas são mais baixas que na linha do Equador.

⁵ No Verão os dias são mais longos do que no Inverno, logo a exposição solar é maior, o que resulta numa maior ionização da camada da Ionosfera. Portanto, as frequências ótimas são maiores que no Inverno.

⁶ O Sol também tem um ciclo de atividade. As explosões solares são as atividades do Sol que mais afetam a ionização da camada da Ionosfera, e por consequente, as comunicações rádio na banda HF.

1.2. Near Vertical Incidence Sky wave (NVIS)

As ondas NVIS são uma particularidade das comunicações HF usadas por militares, radioamadores e *broadcasters*. Este tipo de onda é caracterizado pelos elevados ângulos de fogo das antenas (entre os 60° e os 89°). Se a frequência for demasiado alta, a onda eletromagnética penetra a Ionosfera e o sinal propaga-se para o espaço. Por outro lado, se a frequência for mais baixa que a frequência crítica, o sinal é refletido na Ionosfera e propaga-se em todas as direções resultando numa radiação omnidirecional (Grifo, 2014). Este tipo de propagação é muito útil para contornar obstáculos como demonstra a Figura 3, uma vez que a Ionosfera reflete a energia numa forma de “guarda-chuva”.

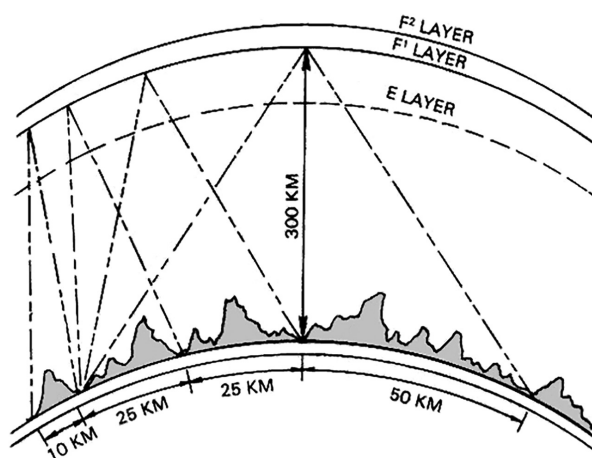


Figura 3 – Propagação NVIS em forma de “guarda-chuva”

Fonte: Adaptado de <http://raynet-hf.net/propagation/> (consultado em 21DEC17).

1.3. Potencialidades e Vulnerabilidades das Comunicações HF

Atualmente, não existe nenhum sistema de comunicações perfeito e sem lacunas, de modo que quaisquer dos serviços de comunicações existentes têm vantagens e desvantagens. As transmissões rádio na banda HF nunca vão substituir o sistema fixo e móvel telefónico como primeira opção para o uso diário da população civil, mas para organizações envolvidas em cenários de emergência ou militares, como o caso das Forças Armadas, é uma ferramenta de comunicação sem fios vital e insubstituível (Codan, 2017). As principais vantagens das comunicações HF são:

- **Capacidade de longo alcance:** enquanto as comunicações rádio nas bandas VHF e UHF só permitem comunicações em linha de vista, as comunicações HF são capazes de ligações acima dos 3000 km.
- **Poucas infraestruturas:** ao contrário das comunicações móveis telefónicas e via satélite, que necessitam de infraestruturas terrestres e repetidores (espaciais ou terrestres), as comunicações HF apenas necessitam de um rádio e uma antena para garantir o seu normal funcionamento, sendo o meio mais fiável de comunicação quando ocorre um desastre.

– **Mobilidade total:** é uma forma de comunicação simples e rápida de implementar e fornece capacidade de comunicação independentemente da localização das estações. As estações fixas (Postos de Comando) podem ser usadas para comunicar com outras bases, ou fornecer Comando e Controlo (C2) para utilizadores no terreno em meios móveis (*vehicle-mounted*) ou portáteis (*manpack*).

– **Interoperabilidade:** tem a possibilidade de integrar sistemas rádio VHF e UHF (*rebroadcast*⁷), redes de telemóveis e redes telefónicas através de desenvolvimentos na tecnologia *cross-patching*⁸. As normas NATO regulamentam a utilização da banda HF para garantir a interoperabilidade entre as diversas nações da aliança.

– **Baixo custo:** em comparação com as comunicações via satélite (a maior alternativa de transmissão a longa distância), as comunicações rádio HF são a escolha mais económica. Após o seu investimento inicial - aproximadamente entre 25000 € e 40000 €, o valor da aquisição de um rádio E/R GRC-525 com *modem* integrado de HF e uma antena dipolo com um ganho elevado, que pode ser variável consoante o número requisitado – não existem mais custos associados (e. g. custo de chamadas, manutenção, ou implementação de repetidor). Adicionalmente, os rádios HF resistem a situações extremas de temperatura e têm um longo período médio entre falhas (MTBF).

– **Comando e Controlo (C2):** as comunicações HF garantem permanentemente um C2 das forças no campo de batalha ou em cenários de catástrofe, uma vez que permitem ligações a grandes distâncias, com equipamentos robustos, capazes de comunicar com todo o tipo de estações (móveis ou fixas).

– **Segurança:** o rádio E/R GRC-525 tem a capacidade de operar numa rede segura no modo *SECOM-H*. Este modo opera em voz e dados com proteção COMSEC (Comunicação Segura), que encripta os dados a ser enviados, e TRANSEC (Transmissão Segura) que utiliza saltos de frequência.

– **Independência nas comunicações de longa distância:** no caso de Portugal, as comunicações de longa distância são maioritariamente por satélite. Uma vez que Portugal não tem satélites em sua posse, tem a necessidade de alugar a países estrangeiros, ficando dependente neste setor. As comunicações HF permitem independência nas comunicações de longa distância em caso de conflito.

As comunicações HF também apresentam fatores desfavoráveis, alguns devido ao declínio da sua utilização e investigação científica, por causa do desenvolvimento das comunicações via satélite nos anos 60. As suas vulnerabilidades são as seguintes:

– **Baixo débito binário:** as formas de onda desenvolvidas e usadas nas normas NATO permitem um débito binário máximo de 9600 bit/s.

– **Constantes mudanças nas condições do canal:** a Ionosfera é uma camada que se altera constantemente, devido às mudanças na exposição e atividade solar, o que altera

⁷ *Rebroadcast* – permite a interligação de duas redes que funcionam em bandas distintas.

⁸ Tecnologia *Cross-Patching* – funciona com um equipamento de controlo remoto digital, que permite a ligação entre diversas tipologias de redes com frequências em diferentes bandas do espectro eletromagnético.

a composição das suas partículas com características refletoras das ondas rádio. Portanto, uma frequência com boas condições iniciais de propagação pode, posteriormente, deixar de transmitir o sinal para a estação recetora. No entanto, sistemas como o ALE 3G vieram minimizar este problema, guardando um grupo de frequências estipuladas e estabelecendo automaticamente a ligação com um canal que apresenta melhores condições de propagação (maior SNR e menor BER), reduzindo o tempo de indisponibilidade da ligação.

2. As Comunicações via Satélite

2.1. Características das Comunicações via Satélite

As comunicações via satélite são ligações de feixes hertzianos que utilizam um satélite artificial como repetidor. As bandas de frequência utilizadas em sistemas de comunicação via satélite estão enquadradas entre a banda UHF e SHF (*Super High Frequency*), e são utilizadas duas frequências diferentes: ascendente⁹ e descendente¹⁰; estas frequências devem ter um afastamento adequado dentro do espectro eletromagnético para evitar interferências, e a frequência ascendente deve ser superior à descendente, maximizando o ganho na receção (Leitão, 2002, p. 3). O Quadro 1 apresenta as bandas disponíveis para uma transmissão via satélite, sendo que: a banda S é empregue por radares meteorológicos e alguns sistemas satélites de comunicação; a banda C é mais utilizada para serviços de rede telefónica ou transmissão de TV analógica e digital; a banda X é de uso estrito militar; e a banda Ku é aplicada para transmissões televisivas via satélite e conexões de dados (Gomes, 2005, p. 2).

Quadro 1 – Bandas de frequências utilizadas em sistemas de radar e satélite.

Tipo de Banda	Frequência Inicial	Frequência Final
Banda L	1 GHz	2 GHz
Banda S	2 GHz	4 GHz
Banda C	4 GHz	8 GHz
Banda X	8 GHz	12 GHz
Banda Ku	12 GHz	18 GHz
Banda K	18 GHz	27 GHz
Banda Ka	27 GHz	40 GHz

Fonte: Adaptado de Leitão (2002, p.3).

Atualmente está a ocorrer uma revolução na comunicação via satélite através da exploração da banda Ka para transmissão de dados, especificamente nas conexões à Internet, devido ao congestionamento das frequências abaixo dos 10 GHz. Esta banda tem a capacidade de disponibilizar serviços com débitos binários elevados. Um acontecimento de grande relevância no desenvolvimento da banda Ka foi o lançamento do satélite SPACEWAY 3, em

⁹ Frequência Ascendente – É a frequência utilizada na comunicação entre a estação terrestre emissora e o satélite.

¹⁰ Frequência Descendente – É a frequência utilizada na comunicação entre o satélite e a estação terrestre recetora.

Abril de 2008, com a capacidade de 10 Gbit/s de *throughput*¹¹ e múltiplos feixes diretivos com a flexibilidade de alocar recursos (Baptista e Marins, 2012, p. 17). No conjunto de fatores que afetam as comunicações via satélite, destacam-se: antena molhada, despolarização das ondas devido à chuva e gelo, atenuação pela atmosfera, atenuação na camada de fusão ou absorção ionosférica (Kota, 2002). Na banda Ka, a atenuação devida à chuva é o factor primordial: para a frequência mais baixa (27 GHz) o valor desta atenuação é cerca de 19 dB/km e para a frequência mais alta (40 GHz) é de 25 dB/km, assumindo uma taxa pluviométrica de 0,01% da média anual a uma precipitação de 95mm/h (Baptista e Marins, 2012, pp. 19-20).

Os satélites também podem ser classificados quanto à sua órbita (Leitão, 2002, p. 10) em:

- **Geostacionários (GEO):** o satélite mantém-se fixo em relação à Terra sobre a linha do Equador, com a mesma velocidade angular da Terra, e a uma altitude de aproximadamente 36 000 km. Este tipo de satélites é aplicável nas comunicações (rádio, televisão, telemóveis e Internet), na observação meteorológica de furacões e tornados, na análise ambiental¹² e para fins militares no apoio ao C2 das forças e aquisição de informações sobre o Inimigo.

- **Órbita baixa (LEO):** encontra-se a uma distância entre 500 a 1500 km de altitude. Este tipo de satélite é utilizado para uma comunicação que cubra uma curta superfície terrestre e que necessite de enviar a informação com o mínimo de atraso. Também é aplicado para observação da Terra.

- **Órbita média (MEO):** encontra-se a uma distância típica entre os 11 000 a 20 000 km de altitude. Os satélites MEO têm como aplicação as comunicações e a navegação (sistema de triangulação GPS).

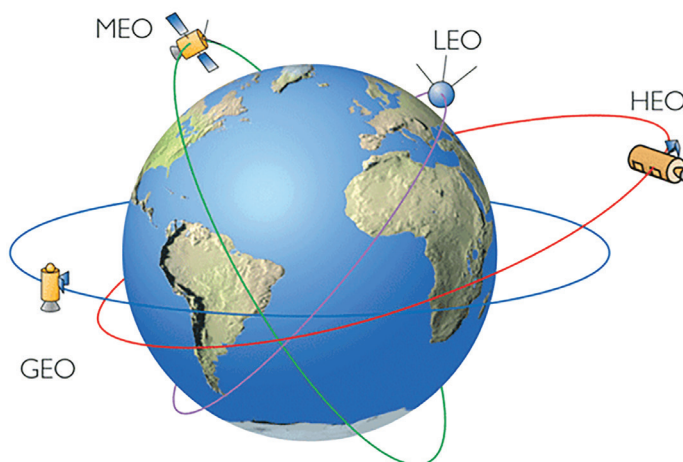


Figura 4 – Órbitas de satélites artificiais existentes

Fonte: Adaptado de Herrera (2016).

¹¹ Throughput (bit/s) – Define-se pelo número de bits por segundo que chegam sem erros ao recetor.

¹² Análise ambiental – controlo de emissões de CO₂ para a atmosfera, deteção de variações da temperatura dos oceanos, controlo da evolução do buraco da camada do ozono, etc.

– Uma outra órbita existente é a **elíptica** (HEO, *Highly Elliptical Orbit*) onde os satélites têm como função cobrir a superfície terrestre dos polos, que não é possível através dos satélites GEO. A Figura 4 demonstra as órbitas mencionadas.

2.2. Potencialidades e Vulnerabilidades das Comunicações via Satélite

As comunicações via satélite apresentam algumas características semelhantes às comunicações HF. As potencialidades em comum com as transmissões HF são a capacidade de longo alcance, a interoperabilidade e a mobilidade total. Para além destas vantagens enumeradas, as comunicações via satélite têm as seguintes potencialidades:

– **Rapidez na transmissão de dados:** como mencionado anteriormente, este tipo de comunicação permite grandes velocidades de transmissão, com um *throughput* máximo registado de 10 Gbit/s. A razão para este sistema ser o mais utilizado em comunicações de longa distância é a grande velocidade de transmissão.

– **Aplicações militares para obtenção de informações sobre o inimigo:** no período da Guerra Fria surgiram os primeiros satélites destinados a aplicações militares, com a finalidade de obter informações sobre as tropas, equipamentos, movimentos de forças e instalações militares do Inimigo.

– **Desenvolvimento económico:** as comunicações via satélite permitem a conexão entre grandes centros económicos e localidades rurais ou insulares mais distantes, proporcionando o desenvolvimento económico destas localidades.

No entanto, as comunicações via satélite apresentam as seguintes vulnerabilidades:

– **Custos elevados:** O tempo de vida estimado de um satélite é de 20 anos (Carvalho, 2017). O custo de produção de um satélite ronda entre os 250 e 300 milhões de USD, e o custo de instalação de um satélite GEO é de 20% o da sua produção, ou seja, 50 milhões de USD¹³ (Lima, 2016). Em relação aos custos deve-se considerar também os gastos na manutenção e instalação das estações de Terra, que podem ser variáveis. Um custo base de implementação de um sistema de comunicações via satélite ronda os 600 a 800 milhões de USD (incluindo as estações de Terra), o que representa 1% do Produto Interno Bruto (PIB) de Portugal. Portanto, para recuperar o investimento, a sua utilização requer um custo por chamada e de dados móveis muito elevados.

– **Segurança:** apesar dos dados nas comunicações via satélite serem encriptados, este sistema é suportado por uma rede de computadores, e nos últimos anos têm-se registado ocorrências de *hacks*. Um dos mais famosos casos de *hacking* a sistemas de satélite militares foi em 2014, por parte do britânico Sean Caffrey, que penetrou no sistema do Departamento de Defesa dos Estados Unidos (US DoD), acedendo a dados pessoais (como correio eletrónico e *password*) de 800 militares (Kumar, 2017). Também existe registos de *hacks* por parte de um grupo russo denominado Turla APT, que tomou vários satélites comerciais para obter, através da Internet, dados sobre governos, militares, diplomatas e organizações de investigação e educação na Europa e Estados Unidos (Khandelwal, 2015).

¹³ USD – *United States Dolares*.

– **Armas antissatélite (ASAT):** são armas espaciais projetadas para destruir satélites com propósitos estratégicos militares. Esta ameaça começou a partir do lançamento do primeiro satélite Sputnik por parte da URSS, em 1957. Atualmente os países que desenvolvem estas armas são os EUA, a Rússia e a China, embora a Índia alegue ter capacidade técnica para o desenvolvimento das mesmas (Rediff India Abroad, 2007).

– **Atenuação devido à chuva:** como referido anteriormente, as bandas das comunicações via satélite com frequências superiores a 10 GHz, apresentam indisponibilidade na ligação quando existe ocorrência de uma grande intensidade de chuva.

3. Estado-de-Arte: Algoritmos de Seleção do Débito Binário

O objetivo de um algoritmo de Seleção do Débito Binário (DRC) é selecionar o débito binário mais alto possível, baseando-se nas condições de propagação do canal (e.g., medidas de SNR e taxa de erro de bit¹⁴ no recetor). No passado, foram propostos alguns algoritmos DRC, mas esta tecnologia desenvolveu-se pouco, com apenas dois algoritmos estruturados: Trinder (Trinder e Gillespie, 2001) e RapidM DRC (Schulze e Hancke, 2005). Estes algoritmos foram concebidos de acordo com as seguintes normas NATO STANAG 4539 (NATO, 2000) e STANAG 4285 (NATO, 1989), com os valores de débito binário de 75, 150, 300, 600, 1200, 2400, 3200, 6400, 4800, 8000 e 9600 bit/s (Sequeira et al., 2017). Ambos os algoritmos utilizam os requisitos de SNR para um BER de 10^{-5} , também definidos nas normas NATO e apresentados no Quadro 2 para os três tipos de canais definidos pela ITU: *Gaussian Noise* (AWGN), *ITU Poor* e *ITU Good*. É assumido que o entrelaçador muito longo, descrito nas normas, é utilizado.

Quadro 2 – Requisitos de SNR para um BER de 10^{-5}

Débito Binário (bit/s)	SNR (dB)		
	AWGN	Good	Poor
75	-6.75	1.75	-2.50
150	-4.00	2.00	-1.00
300	-1.50	5.50	1.00
600	2.02	12.18	7.10
1200	5.25	14.95	10.10
3200	7.60	21.40	15.00
4800	12.29	25.21	19.75
6400	14.69	30.71	22.20
8000	15.44	35.56	25.50
9600	20.48	42.02	29.75

Fonte: Adaptado de Schulze e Hancke (2015, p. 55).

¹⁴ Taxa de Erro de Bit – Define-se como a razão entre o número de bits errados pelo número total de bits enviados.

3.1. Algoritmo Trinder

O algoritmo Trinder, proposto em Trinder e Gillespie (2001), foi um dos primeiros algoritmos DRC, tendo como principal objectivo servir como uma diretriz para os implementadores do STANAG 5066 (NATO, 2015). Este algoritmo utiliza a medida de taxa de erro de tramas¹⁵ (FER – *Frame Error Rate*) para seleccionar o débito binário de transmissão. Como o rádio só mede directamente o valor de SNR e de BER, o valor de FER é calculado através da equação (1), em que L é o tamanho da trama em bits e BER é a taxa de erros binários, que é estimada através da SNR medida na estação recetora.

$$FER = 1 - (1 - BER)^L \quad (1)$$

O algoritmo Trinder selecciona o débito binário através dos valores limites de FER estabelecidos por Trinder e Gillespie (2001) e representados no Quadro 3: se a estimativa de FER for superior (ou inferior) ao FER mínimo (máximo), o débito binário é reduzido (aumentado) para o valor imediatamente abaixo (acima) do corrente.

Quadro 3 – Valores de Decisão de FER para seleccionar o Débito Binário no algoritmo Trinder

Débito Binário (bit/s)	FER mínimo (Débito Binário Diminui)	FER máximo (Débito Binário Aumenta)
75	-	10%
150	50%	10%
300	50%	10%
600	50%	10%
1200	50%	10%
3200	50%	10%
4800	35%	5%
6400	20%	5%
8000	15%	2%
9600	5%	-

Fonte: Adaptado de Trinder e Gillespie (2001).

3.2. Algoritmo RapidM

O algoritmo RapidM (Schulze e Hancke, 2005) é baseado em quatro regras:

– **Regra 1:** o débito binário é seleccionado através da SNR medida e dos requisitos de SNR para um BER de 10^{-5} (cf. Quadro 2). Por exemplo, se a medida de SNR for 14 dB para um canal AWGN, o débito binário é ajustado para o valor de 4800 bit/s (cf. Quadro 3).

¹⁵ Taxa de Erro de Tramas (%) – Define-se como a razão entre o número de tramas (ou pacotes de dados) erradas e o número total de tramas enviadas.

– **Regra 2:** calcula a variação de débito binário a ser aplicada, com base na variação de SNR, conforme a equação (2), e assumindo que estas variações são proporcionais entre si (a equação linear que relaciona estas variações é obtida através do ajuste das curvas dos valores de SNR e débito binário do Quadro 2).

$$\Delta \text{SNR} = \text{SNR}_{\text{measured}} - \text{SNR}_{\text{required}} \quad (2)$$

– **Regra 3:** seleciona o novo débito binário através da comparação do BER atual com os limites de BER apresentados no Quadro 4: se o BER for maior ou igual a 10^{-4} , então o débito binário deve diminuir; se o valor de BER for menor ou igual a 10^{-6} , então o débito binário deve aumentar; caso contrário, o débito binário anterior é mantido.

Quadro 4 – Limites de BER para a Regra 3 do Algoritmo RapidM

BER	Ação do Algoritmo DRC
$\geq 10^{-4}$	Diminui Débito Binário
$\in [10^{-6}, 10^{-4}[$	Mantém Débito Binário
$< 10^{-6}$	Aumenta Débito Binário

Fonte: Adaptado de Schulze e Hancke (2015, p. 96).

– **Regra 4:** implementa controles de segurança que não permitem o aumento do débito binário em mais de dois níveis (e.g., se o débito binário é 600 bit/s, então o novo débito binário pode ser no máximo de 3200 bit/s), ou não permite a diminuição do débito binário em mais de três níveis.

A Regra 1 é aplicada quando: 1) o valor de SNR decai 12 dB ou mais entre duas medidas de SNR consecutivas, ou 2) o débito binário é menor ou igual a 300 bit/s e o valor de SNR é maior ou igual a 20 dB. A Regra 2 é aplicada quando o valor de SNR aumenta mais de 9 dB, ou decai entre 9 a 12 dB, entre duas medidas consecutivas da qualidade do canal. A Regra 3 é aplicada quando nenhuma das condições é verificada para as Regras 1 e 2. A Regra 4 assegura que o débito binário não aumenta mais de dois níveis, ou diminui mais de três níveis, quando as Regras 1 e 2 são aplicadas.

4. Implementação e Avaliação dos Algoritmos DRC

O sistema de simulação desenvolvido para implementar e analisar os algoritmos DRC é representado pelo fluxograma da Figura 5, e o código correspondente, desenvolvido em Matlab, está disponível em Sequeira (2018). O sistema começa por aplicar um processo de inicialização que lê os requisitos de SNR para um BER de 10^{-5} e para o tipo de canal considerado, que pode ser AWGN, *ITU Poor* ou *ITU Good*. Este processo continua com a leitura do valor corrente de SNR, que leva ao cálculo do débito binário inicial, por comparação do SNR atual com os valores de SNR dos requisitos. Como exemplo, para um canal *ITU Good* e com valor inicial de SNR de 25 dB, o débito binário inicial é 3200 bit/s (cf. Quadro 2).

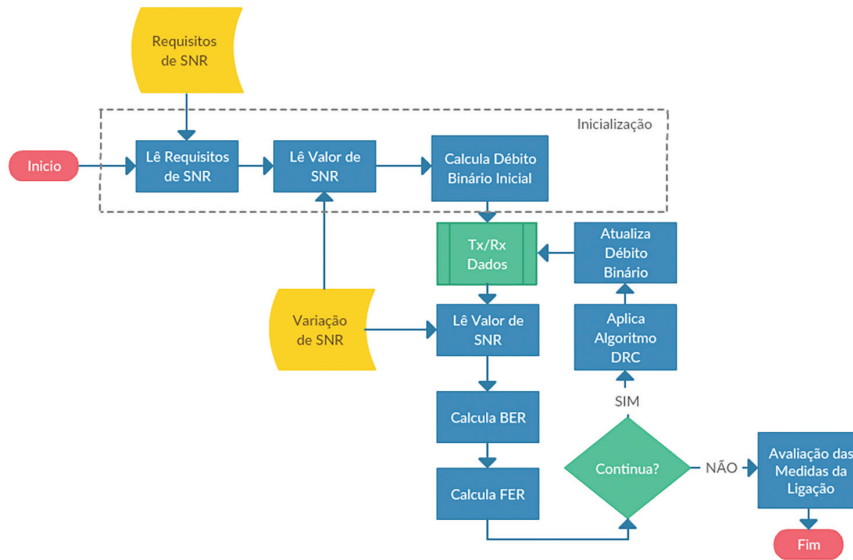


Figura 5 – Fluxograma do Sistema de Simulação

Fonte: Retirado de Sequeira et. al. (2017).

A transmissão de dados começa após o processo de inicialização. Periodicamente, o sistema lê os valores correntes de SNR e calcula o BER e FER correspondente através das equações (1), (2) e (3). A última equação assume uma variação de BER vs. SNR de uma década (no BER) por 1 dB (no SNR), válida para baixos valores de BER, como demonstra a Figura 6.

$$\text{BER} = 10^{-5} \times 10^{-\Delta \text{SNR}} \quad (3)$$

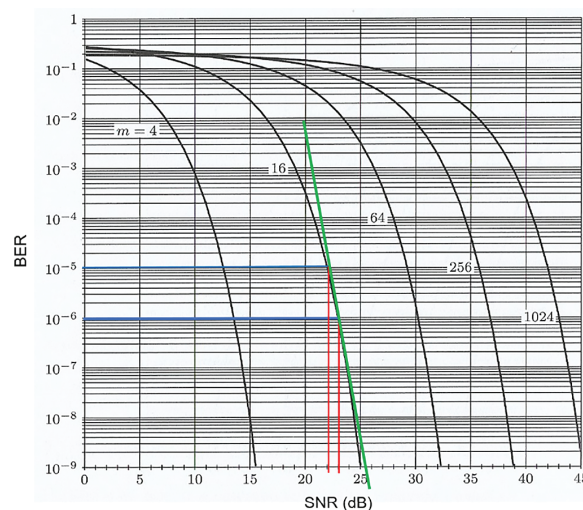


Figura 6 – BER em função do SNR, para uma modulação M-QAM, com uma linha reta (em verde) representando a variação de BER em 1 década por dB.

Fonte: Adaptado de Salema (2011).

Baseado nestes valores, e no débito binário atual, é calculado um novo débito binário pelo algoritmo DRC e que é aplicado ao próximo intervalo de transmissão. No final de cada transmissão, são calculadas as seguintes medidas de avaliação da ligação:

1) BER médio – definido pela equação (4), onde BER_i é o valor do BER para o intervalo de transmissão i , sendo T_i a duração do intervalo e N o número total de intervalos. Sempre que o valor de BER for superior a 10^{-3} , considera-se que a ligação se encontra ao corte. A variável auxiliar, τ_i , calculada pela equação (5), contabiliza o número de intervalos em que a ligação não esteve ao corte. O valor de BER médio é calculado quando a ligação está disponível.

$$\overline{BER} = \frac{\sum_{i=1}^N BER_i \times \tau_i(BER_i)}{\sum_{i=1}^N \tau_i(BER_i)} \quad (4)$$

$$\tau_i(BER_i) = \begin{cases} T_i & \text{if } BER_i \leq 10^{-3} \\ 0 & \text{if } BER_i > 10^{-3} \end{cases} \quad (5)$$

2) FER médio (em %) – definido pela equação (6), onde FER_i é o valor do FER para o intervalo i . Tal como o BER médio, esta métrica só é contabilizada quando a ligação está disponível.

$$\overline{FER} = \frac{\sum_{i=1}^N FER_i \times \tau_i(BER_i)}{\sum_{i=1}^N \tau_i(BER_i)} \times 100 [\%] \quad (6)$$

3) Disponibilidade da Ligação (em %) – definido pela equação (7), é a percentagem do tempo em que o valor do BER é inferior a 10^{-3}

$$LA = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i(BER_i)}{\sum_{i=1}^N T_i} \times 100 [\%] \quad (7)$$

4) Throughput médio (em bit/s) - definido pela equação (8), representa o número de bit/s corretos que chegam ao recetor

$$\overline{Th} = \frac{\sum_{i=1}^N DR_i \times \tau_i(BER_i) \times (1 - BER_i)}{\sum_{i=1}^N T_i} [\text{bit/s}] \quad (8)$$

5) Goodput médio (em frames/s) - definido pela equação (9), onde L é o tamanho da trama em bits, representa o número de tramas/s corretas que chegam ao recetor

$$\overline{Gp} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{DR_i}{L} \times (1 - FER_i) \times \tau_i(BER_i)}{\sum_{i=1}^N T_i} [\text{tramas/s}] \quad (9)$$

Os algoritmos DRC foram avaliados no sistema de simulação para quatro tipos de variação de SNR: crescente, decrescente, sinusoidal e abrupta. Todas as variações de SNR foram testadas para os três tipos de canais, AWGN, *ITU Good* e *ITU Poor*, resultando num total de doze simulações diferentes por algoritmo. Derivado a restrições de espaço, os resultados

descritos neste artigo são apenas para uma variação de SNR crescente e para um canal *ITU-R Poor*. Os restantes resultados estão disponíveis em Sequeira (2017). Para as simulações foram usados os seguintes parâmetros: duração do intervalo (T_i) igual a 120 segundos; número total de intervalos medidos (N) igual a 100; um tamanho de trama (L) de 250 bytes.

4.1. Avaliação dos Algoritmos Trinder e RapidM: Resultados e Vulnerabilidades

A Figura 7 representa a adaptação do débito binário utilizando os algoritmos Trinder e RapidM, para uma variação de SNR crescente e para os três tipos de canais considerados. Os resultados das métricas de avaliação da ligação, para ambos os algoritmos, são apresentados no Quadro 5.

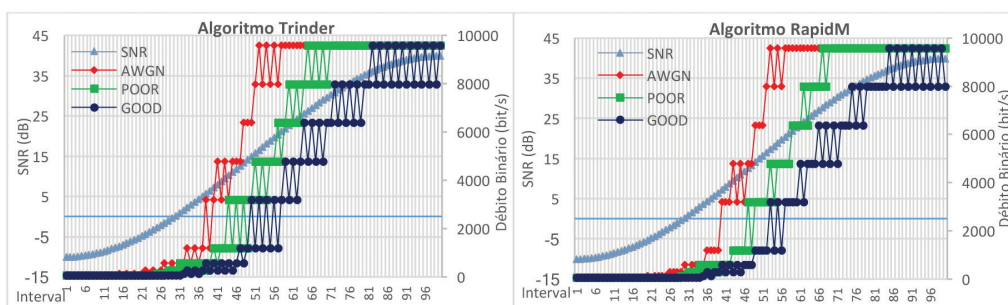


Figura 7 – Adaptação do débito binário para uma variação de SNR crescente, utilizando os algoritmos DRC

Fonte: Retirado de Sequeira (2017).

Quadro 5 – Resultados das medidas de avaliação da ligação para os algoritmos DRC

Medidas	Algoritmo DRC	
	Trinder	RapidM
$\overline{BER}$	4.91E-05	1.10E-05
$\overline{FER}$	6.59%	1.96%
$\overline{LA}$	66%	72%
$\overline{Th}$ (bits/s)	4001	4189
$\overline{Gp}$ (frames/s)	1.942	2.066

Fonte: Adaptado de Sequeira (2017).

A principal vulnerabilidade detetada nos algoritmos DRC é a ocorrência de oscilações no débito binário que levam ao corte da ligação ($BER \geq 10^{-3}$), reduzindo a disponibilidade da ligação. A Figura 8 representa os valores de BER resultantes, onde se verifica que as oscilações do débito binário coincidem com valores de BER acima dos 10^{-3} . Como esperado no estado-de-arte, o algoritmo RapidM apresenta melhores resultados que o algoritmo Trinder; no entanto, apresenta diversas oscilações que levam a um estado de corte da ligação.

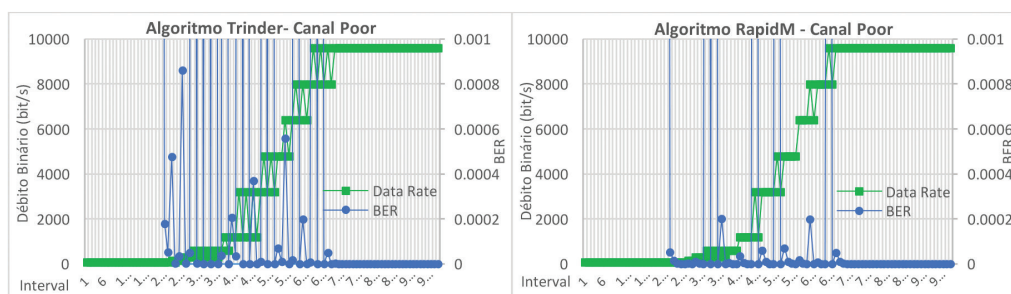


Figura 8 – Variação de BER vs. Débito Binário, para uma variação de SNR crescente e um canal ITU Poor

Fonte: Retirado de Sequeira (2017).

4.2. Propostas de Melhoria dos Algoritmos Trinder e RapidM

Esta secção descreve e avalia as propostas de solução para melhorar o desempenho dos algoritmos Trinder e RapidM, denominadas de *Avoiding Cut-Off State* (ACOS) e *Bit Error Optimization* (BEO). Como anteriormente, os resultados são apenas apresentados para o caso de uma variação de SNR crescente e um canal ITU-R *Poor*.

4.2.1. *Avoiding Cut-Off State* (ACOS)

O algoritmo ACOS é baseado na previsão do valor do BER calculado pelas equações (2) e (3): se o novo débito binário levar a uma previsão de BER superior a 10^{-3} , então não será aplicado o novo débito binário, sendo o seu valor reduzido de acordo com o fluxograma da Figura 9.

O Quadro 6 apresenta as medidas de avaliação da ligação resultantes, após aplicar a solução ACOS aos algoritmos Trinder e RapidM, demonstrando uma clara melhoria na LA , no $\overline{Th}$ e no $\overline{Gp}$. O aumento do FER e BER médio é uma consequência direta do aumento da disponibilidade da ligação. No entanto, algumas oscilações no débito binário continuam a ocorrer em ambas as situações, que podem ser observadas na Figura 10, para o caso do algoritmo RapidM. Estas oscilações coincidem com valores de BER acima de 10^{-4} , correspondente ao valor limite de BER que aciona a diminuição do débito binário no algoritmo RapidM (cf. Quadro 4).

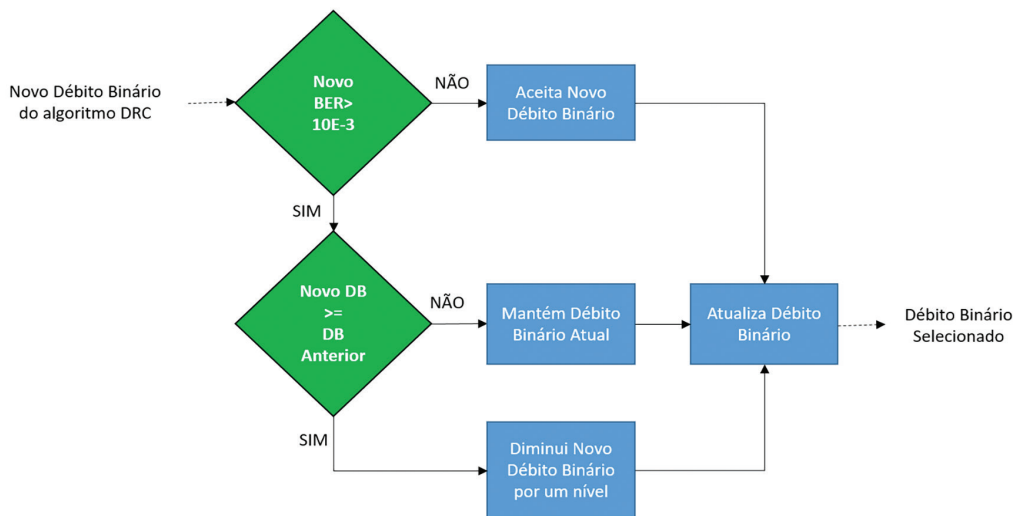


Figura 9 – Fluxograma do algoritmo *Avoiding Cut-Off State*

Fonte: Adaptado de Sequeira (2017).

Quadro 6 - Resultados das medidas de avaliação da ligação para os algoritmos DRC com ACOS.

Medidas	Algoritmo DRC	
	Trinder ACOS	RapidM ACOS
$\overline{BER}$	5.14E-05	2.11E-05
$\overline{FER}$	7.01%	3.28%
LA	78%	77%
$\overline{Th}$ (bits/s)	4350	4319
$\overline{Gp}$ (frames/s)	2.091	2.101

Fonte: Adaptado de Sequeira (2017).

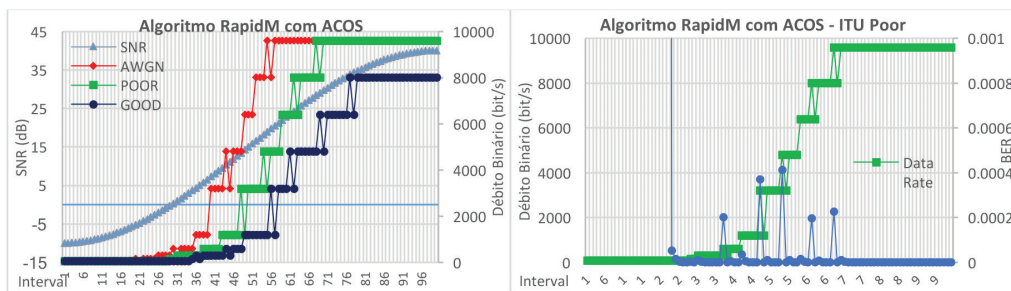


Figura 10 – Adaptação do débito binário, com uma variação crescente de SNR, para o algoritmo RapidM com ACOS.

Fonte: Retirado de Sequeira (2017).

4.2.2. Bit Error Optimization (BEO)

A principal diferença entre os algoritmos ACOS e BEO é a condição que se segue ao cálculo da previsão do BER: em vez de se comparar o novo BER com o correspondente à indisponibilidade da ligação (10^{-3}), compara-se com o limite de BER que aciona a diminuição do débito binário nas versões originais dos algoritmos DRC. No caso do algoritmo RapidM é um valor de BER igual a 10^{-4} , e para o caso do algoritmo Trinder é o BER correspondente ao FER mínimo representado no Quadro 4, para cada nível de débito binário. O fluxograma do algoritmo BEO é idêntico ao representado na Figura 9, com exceção do bloco da primeira condição.

O Quadro 7 apresenta as medidas de avaliação da ligação resultantes da aplicação da solução BEO aos algoritmos Trinder e RapidM e, tal como no algoritmo ACOS, existe uma clara melhoria nas medidas relevantes. O algoritmo BEO apresenta uma ligeira melhoria no *goodput* médio em relação à solução ACOS. Também é importante realçar que utilizando a solução BEO, as diferenças entre os algoritmos Trinder e RapidM são marginais. A Figura 11 confirma que a solução BEO elimina as oscilações que estavam ainda presentes no algoritmo RapidM com ACOS. O mesmo se sucede com a solução Trinder com BEO.

Quadro 7 - Resultados das medidas de avaliação da ligação para os algoritmos DRC com BEO

Medidas	Algoritmo DRC	
	Trinder BEO	RapidM BEO
$\overline{BER}$	1.95E-05	6.05E-06
$\overline{FER}$	3.44%	1.16%
$\overline{LA}$	78%	77%
$\overline{Th}$ (bits/s)	4334	4319
$\overline{Gp}$ (frames/s)	2.144	2.142

Fonte: Adaptado de Sequeira (2017).

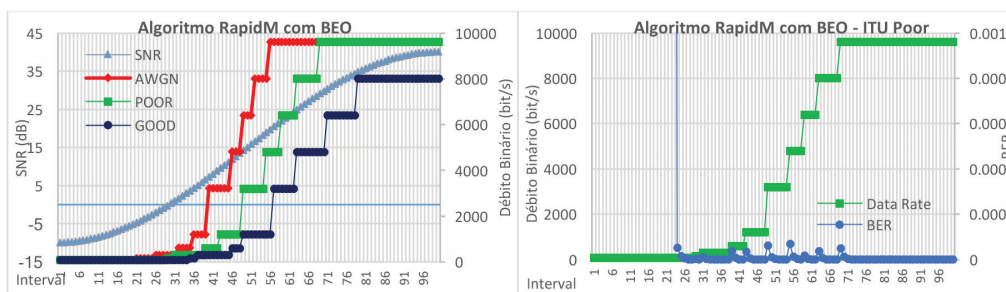


Figura 11 - Adaptação do débito binário, com uma variação crescente de SNR, para o algoritmo RapidM com BEO

Fonte: Retirado de Sequeira (2017).

5. Testes em Condições Reais de Propagação

Esta seção detalha os testes de propagação no terreno para os algoritmos DRC (versões originais e melhoradas), conduzidas durante o período de 30 de Agosto de 2017 a 7 de Setembro de 2017, assim como os resultados obtidos na avaliação dos algoritmos.

5.1. Descrição das Condições dos Testes no Terreno

Os testes dos algoritmos DRC em condições reais de propagação foram realizados com duas estações fixas localizadas nas cidades de Lisboa (Unidade de Apoio ao Comando da Logística) e Porto (Regimento de Transmissões), com uma distância de ligação em linha reta de 282 km. Cada estação foi equipada com um rádio E/R GRC-525 e uma antena dipolo RF-1936P, como se pode observar na Figura 12.

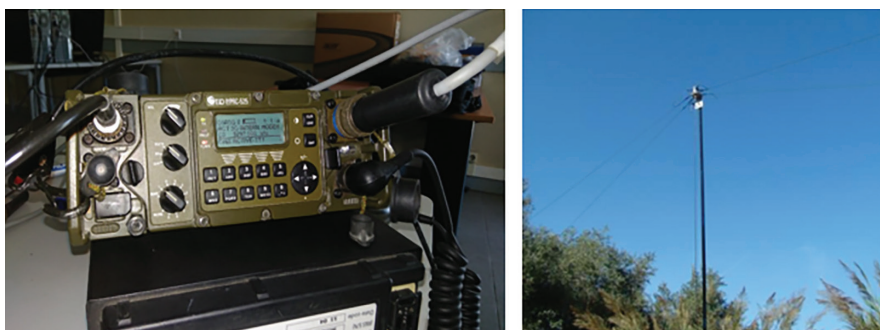


Figura 12 – Rádio E/R GRC-525 e antena dipolo RF-1936P

Fonte: Retirado de Sequeira et. al. (2017).

Antes de se proceder à instalação das estações, foi necessário planear a missão da transmissão de dados e o comportamento da Ionosfera para os dias dos testes, ao analisar a frequência crítica de reflexão na camada F2 (f_oF_2) e a frequência máxima utilizável (MUF), disponível na Associação Observatório AeroEspacial Amadores de Satélite-CT [AMSAT-CT] (2017). Baseado nesses valores, foram escolhidas oito frequências entre os 4 MHz e 8 MHz para constituir o *scan group* do modo ALE 3G. Durante a comunicação, o rádio E/R GRC-525 procura a frequência com as melhores condições de propagação (i.e., com o maior SNR e menor BER). Como os desempenhos dos algoritmos DRC devem ser comparados com condições de propagação semelhantes, foram registadas outras medidas ionosféricas e meteorológicas, através da AMSAT-CT (2017) e da Impala Multimédia (2017), para cada dia em que foi realizado um teste, nomeadamente tempestades geomagnéticas e avisos de desvanecimento de sinais HF.

Para avaliar os algoritmos DRC no terreno, foi transmitido entre as estações um ficheiro de texto com 8 Mbytes de tamanho. O entrelaçador escolhido para a transmissão de dados foi o longo e o tamanho da trama escolhido foi 250 bytes, tal como utilizado no sistema de simulação.

5.2. Resultados dos Testes em Condições Reais de Propagação

Os resultados dos testes de propagação no terreno estão apresentados, resumidamente, no Quadro 8. O algoritmo RapidM com BEO obteve o melhor desempenho, aumentando a disponibilidade da ligação em 15% e o *throughput* num fator de 6.4 em comparação com a versão original do algoritmo RapidM. As condições meteorológicas e ionosféricas, durante os dias correspondentes à avaliação destes algoritmos, podem ser consideradas semelhantes, tal como se comprova em Sequeira (2017, pp. 111-112).

Quadro 8 – Resultados da avaliação dos algoritmos DRC em condições reais de propagação

Algoritmo	Dia	LA	$\overline{SNR}$ (dB)	$\overline{BER}$	$\overline{Th}$ (bit/s)
RapidM	30/08/17	84%	9.50	5.08E-06	380
RapidM ACOS	31/08/17	96%	9.33	6.69E-05	892
RapidM BEO	01/09/17	99%	9.55	2.76E-04	2425
Trinder	04/09/17	83%	3.97	3.69E-04	246
Trinder ACOS	05/09/17	86%	4.98	1.82E-04	1509
Trinder BEO	07/09/17	96%	3.38	2.68E-04	719

Fonte: Adaptado de Sequeira (2017).

No entanto, não é possível comparar diretamente o desempenho entre os algoritmos RapidM e Trinder, incluindo as respetivas versões melhoradas, uma vez que as condições de propagação foram bastante diferentes (e.g., o SNR médio na estação recetora foi muito mais baixo para os testes com o algoritmo Trinder em relação aos testes com o algoritmo RapidM, tal como se verifica no Quadro 8). Não obstante, ainda é possível verificar que as soluções desenvolvidas para o algoritmo Trinder conduzem a melhores desempenhos do que a versão original. Apesar do algoritmo Trinder com BEO ter sido testado num dia com o valor médio do SNR mais baixo (3.38 dB), continuou a apresentar uma grande melhoria em relação à versão original do algoritmo, aumentando a disponibilidade da ligação em 13% e o *throughput* de um fator de 2.9.

5.3. Validação do Sistema de Simulação

Um dos parâmetros guardados pelo equipamento rádio durante os testes de propagação no terreno foram os valores de SNR medidos na estação recetora. Estes valores foram utilizados como valores de entrada no sistema de simulação implementado, tendo sido calculado o coeficiente de correlação entre os débitos binários reais e simulados. A maior correlação obtida, com o valor de 0.91, foi para o algoritmo Trinder com ACOS, testado a 5 de setembro de 2017. A Figura 13 demonstra a adaptação de débito binário no teste real de propagação e a obtida no sistema de simulação, onde é possível verificar um comportamento idêntico entre ambos os resultados, o que valida o sistema de simulação implementado.

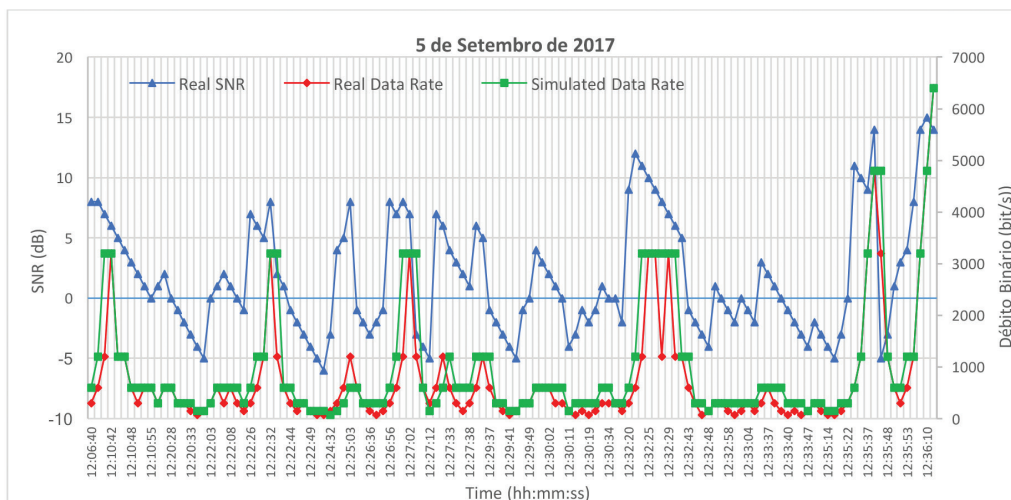


Figura 13 – Adaptação do débito binário (real e simulado) para a variação de SNR medida no dia 5 de Setembro de 2017, utilizando o algoritmo Trinder com ACOS.

Fonte: Adaptado de Sequeira (2017).

Conclusões

O principal objetivo da investigação descrita neste artigo foi o desenvolvimento e implementação dum algoritmo DRC eficiente para comunicações HF, com o intuito de ser usado pelos meios de transmissão do Exército Português, nomeadamente o rádio E/R GRC-525.

Em primeiro lugar, descreveram-se as comunicações HF, apresentando as suas características e o modo de funcionamento para transmissão de dados em longas distâncias, utilizando a Ionosfera como meio de reflexão das ondas rádio. As suas vulnerabilidades e potencialidades foram salientadas, e comparadas com as das comunicações via satélite (uma forma de comunicação alternativa para distâncias longas). Após uma análise comparativa entre as duas formas de transmissão com longo alcance, conclui-se que as comunicações HF fornecem uma maior robustez a situações catastróficas e de emergência, menores custos de implementação e manutenção, maior segurança na encriptação e transmissão de dados, e independência nas comunicações militares de um país com fracos recursos económicos. O fator determinante para a utilização em massa das comunicações via satélite é a grande velocidade de transmissão de dados, que é substancialmente maior do que proporcionada pelas comunicações HF.

Para responder à questão central deste artigo: ***“De que forma se pode otimizar as comunicações HF apresentando melhores resultados que as soluções atuais?”***; recorreu-se ao estudo de algoritmos de seleção automática do débito binário (DRC) para comunicações HF, nomeadamente ao algoritmo Trinder (2001) e RapidM (Schulze e Hancke, 2005), cujas características foram apresentadas no estado-de-arte.

Foi desenvolvido um sistema de simulação em Matlab para avaliar os algoritmos DRC existentes e detetar as suas vulnerabilidades. Após a implementação dos algoritmos Trinder e RapidM, as principais fraquezas detetadas foram as oscilações no débito binário que levavam ao corte da ligação, reduzindo a disponibilidade da ligação e o valor médio do *throughput* e do *goodput*. A fim de aumentar o desempenho dos algoritmos Trinder e RapidM, foram propostas duas novas versões dos mesmos: *Avoiding Cut-Off State* (ACOS) e *Bit Error Optimization* (BEO). Quando implementadas no sistema de simulação, estas propostas demonstraram grandes melhorias em relação às versões originais; no entanto, permaneceram algumas oscilações do débito binário no algoritmo ACOS.

Depois de serem avaliadas os algoritmos no sistema de simulação, foram instaladas duas estações, uma em Lisboa e outra no Porto. Cada estação foi equipada com um rádio E/R GRC-525 e uma antena dipolo RF-1936P. Desenvolveu-se uma aplicação em *Visual Studio C#*, implementando todos os algoritmos DRC (as versões originais e as propostas de melhoria), permitindo avaliar os algoritmos no terreno. O algoritmo que apresentou melhor desempenho foi o RapidM com BEO, aumentando a disponibilidade da ligação em 15% e o *throughput* num fator de 6.4, em comparação com a versão original e em condições de propagação semelhantes. O algoritmo Trinder com BEO foi avaliado com as piores condições de propagação (com um SNR médio de 3.38 dB), e mesmo com esta adversidade demonstrou um desempenho melhor que a sua versão original, aumentando a disponibilidade da ligação em 13% e o *throughput* de um fator de 2.9.

Este trabalho possui como principais contribuições: um sistema de simulação desenvolvido para avaliar algoritmos DRC, que foi validado através da correlação com os resultados obtidos nos testes em condições reais de propagação (apresentando um valor de 0.91 no coeficiente de correlação para os testes realizados no dia 5 de Setembro de 2017); duas versões de algoritmos DRC que apresentam melhores desempenhos que as soluções existentes; e pela primeira vez foi registado, cientificamente, o desempenho de algoritmos DRC em condições reais de propagação, uma vez que no trabalho desenvolvido por Schulze e Hancke (2005) apenas foram testados algoritmos num simulador de canais HF. Portanto, as vantagens identificadas são a otimização das comunicações HF, com um maior *throughput* médio e menor taxa de erros de bit na transmissão de dados; e uma primeira experiência real dos algoritmos DRC no terreno.

Como possíveis novas linhas de investigação requer-se a implementação dos algoritmos DRC desenvolvidos juntamente com o STANAG 5066 (NATO, 2015), que fornece serviços de e-mail através de comunicações rádio na banda HF. Para se obter um algoritmo DRC mais eficiente, propõem-se o desenvolvimento e avaliação de um algoritmo com tramas de tamanho variável, através da análise das condições de propagação.

Referências Bibliográficas

Associação Observatório AeroEspacial Amadores de Satélite-CT, 2017. *Propagação por Reflexão Ionosférica e Efeito NVIS* [Em linha] Oeiras, Portugal. Disponível em: <http://www.amsat-ct.pt/?page_id=1221>, [Consult. em 17 de julho de 2017].

- Banco Mundial, 2016. *Portugal – Data* [Em linha] Washington, D. C., EUA: World Bank Group. Disponível em: < <https://data.worldbank.org/country/PT?locale=pt>>, [Consult. em 08 de dezembro de 2017].
- Baptista, R. e Marins, C., 2012. Sistemas de Comunicação via Satélite operando em Banda Ka. *Revista de Seleção Documental do GLPA*, Dezembro de 2012, N. 27, pp.16-22.
- Bilitza, D., 2001. *International Reference Ionosphere*. Virginia, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Carvalho, A., 2017. A vida e a morte de um satélite artificial na órbita da Terra. *UOL Notícias*, [Blog de Notícias] 03 de outubro de 2017. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/ciencia/ultimas-noticias/redacao/2017/10/03/a-vida-e-a-morte-de-um-satelite.htm>>, [Consult. em 08 de dezembro de 2017].
- Ceita, A., 2014. *Estudo Comparativo de duas Antenas para Comunicação por Efeito NVIS*. Tese de Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Academia Militar e Instituto Superior Técnico: Lisboa.
- Codan Radio Communications, 2017. *Why HF Radio?* [Em linha] Adelaide, South Australia, Australia: Codan. Disponível em: <<https://www.codanradio.com/about-codan-radio/why-hf-radio/>>, [Consult. em 12 de dezembro de 2017].
- Gomes, P., 2005. *Comunicações via Satélite e Transmissão em Fibra Ótica*. [pdf] Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil: Centro Universitário Moura Lacerda. Disponível em: <<http://pgomes.com.br/arquivos/75febcb272a8e9d760799bf484361fa9.pdf>>, [Consult. em 10 de dezembro de 2017].
- Gonçalves, M., 2013. *Interviewee*. Entrevistado por Renato Rocha [Presencialmente]. Lisboa, 12 de abril de 2013.
- Grifo, P., 2014. *Relatório de Avaliação do Emprego Operacional do E/R GRC-525 na banda HF*. Lisboa, Portugal: Direção de Comunicações e Sistemas de Informação (DCSI).
- Hargreaves, J., 1995. *The Solar-Terrestrial Environment*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Herrera, R., 2016. *El problema de los tres cuerpos y la comunicación global. Parte 2*. [Em linha] Cidade do México, México: Revista C2. Disponível em: < <http://www.revistac2.com/el-problema-de-3-cuerpos-y-la-comunicacion-global-parte-2/>> [Consult. em 15 de dezembro de 2017].
- Impala Multimédia, 2017. *Impala News* [Em linha] Sintra, Portugal. Disponível em: <<http://www.impala.pt/>>, [Consult. em 29 de Agosto de 2017].
- Johnson, E., Koski, E., Furman, W., Jorgenson, M. e Nieto, J., 2013. *Third-Generation and Wideband HF Radio Communications*. Norwood, Massachusetts, EUA: Artech House.
- Khandelwal, S., 2015. *Russian Hackers Hijack Satellite To Steal Data from Thousands of Hacked Computers*. [Em linha] Deli, India: The Hacker News. Disponível em: <<https://thehackernews.com/2015/09/hacking-satellite.html>> [Consult. em 16 de dezembro de 2017].
- Kota, S., 2002. *Quality of Service for Broadband Satellite internet – ATM and IP Services*. Oulu, Finlândia: Department of Electrical and Information Engineering Telecommunications Laboratory, University of Oulu.

- Kumar, M., 2017. *25-Year-Old Hacker Pleads Guilty to Hacking U.S. Military Satellite Phone System*. [Em linha] India: The Hacker News. Disponível em: <<https://thehackernews.com/2017/06/british-hacker-military-system.html>> [Consult. em 16 de dezembro de 2017].
- Leitão, M., 2002. *Sistemas de Comunicação por Satélite*. [pdf] Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Disponível em: <https://web.fe.up.pt/~mleita0/SRCO/Teoricas/SRCO_SAT.pdf>, [Consult. em 10 de dezembro de 2017].
- North Atlantic Treaty Organization, 1989. *STANAG 4285: Characteristics of 1200 / 2400 / 3600 Bits per Second Single Tone Modulators / Demodulators for HF Radio Links*. Washington, D. C., EUA: NATO.
- North Atlantic Treaty Organization, 2000. *STANAG 4539: Technical Standards for Non-Hopping HF Communications Waveforms*. Washington, D. C., EUA: NATO.
- North Atlantic Treaty Organization, 2015. *STANAG 5066: Profile for HF Radio Data Communications*. Washington, D. C., EUA: NATO.
- Rediff India Abroad, 2007. *Chinese anti-satellite test no big deal* [Em linha] Bombaím, India. Disponível em: <<http://www.rediff.com/news/2007/mar/27china.htm>>, [Consult. 15 de outubro de 2018].
- Rocha, R., 2013. *Comunicações Táticas e de Emergência por Propagação por Efeito NVIS*. Tese de Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Academia Militar e Instituto Superior Técnico: Lisboa.
- Salema, C., 2011. *Feixes Hertzianos*. 3ª ed. Lisboa: Instituto Superior Técnico Press.
- Schulze, S. e Hancke, G., 2005. *Design and Implementation of a STANAG 5066 Data Rate Change Algorithm for High Data Rate Autobaud Waveforms*. Tese de Dissertação de Mestrado em Engenharia de Computadores. Universidade de Pretoria: Pretoria, África do Sul.
- Sequeira, V., 2017. *Data Rate Change Algorithms for HF Band Efficient Communications Using the E/R GRC-525 Radio*. Tese de Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Academia Militar e Instituto Superior Técnico: Lisboa.
- Sequeira, V., 2018. *Data Rate Change Algorithms for Efficient HF Communications*. *VascoSequeira/drc-algorithms*, [Github] 26 de janeiro. Disponível em: <<https://github.com/VascoSequeira/drc-algorithms>>, [Consult. em 8 de fevereiro de 2018].
- Sequeira, V., Queluz, M., Rodrigues, A., Sanguino, J. e Grifo, P., 2017. Algoritmos de Seleção de Débito Binário em Comunicações Rádio na Banda HF. In: AM (Academia Militar) e IUM (Instituto Universitário Militar), *Jornadas das Engenharias da Academia Militar 2017*. 06 de dezembro de 2017. Amadora, Portugal: Academia Militar.
- Trinder, S. e Gillespie, A., 2001. Optimisation of the STANAG 5066 ARQ Protocol to Support High Data Rate HF Communication. In: MILCOM (Military Communications (MILCOM)), *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM) 2001*. Outubro de 2001. Washintgon, USA: MILCOM.