ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS

CAP COM BRUNO ELIAS RIBEIRO

O EMPREGO DOS DISPOSITIVOS DE RF EM FOTÔNICA E SUAS VANTAGENS PARA O ÊXITO DA FUNÇÃO DE COMBATE COMANDO E CONTROLE

Rio de Janeiro
2018

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS

CAP COM BRUNO ELIAS RIBEIRO

O EMPREGO DOS DISPOSITIVOS DE RF EM FOTÔNICA E SUAS VANTAGENS PARA O ÊXITO DA FUNÇÃO DE COMBATE COMANDO E CONTROLE

Trabalho acadêmico apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito para a especialização em Ciências Militares com ênfase em Guerra Eletrônica.

Rio de Janeiro
2018

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DECEx - DESMil
ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS
(EsAO/1919)

DIVISÃO DE ENSINO / SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: **Cap Com BRUNO ELIAS RIBEIRO**

Título: **O EMPREGO DOS DISPOSITIVOS DE RF EM FOTÔNICA E SUAS VANTAGENS PARA O ÊXITO DA FUNÇÃO DE COMBATE COMANDO E CONTROLE.**

Trabalho Acadêmico, apresentado à Escola de Aperfeiçoamento de Oficiais, como requisito parcial para a obtenção da especialização em Ciências Militares, com ênfase em Guerra Eletrônica, pós-graduação universitária lato sensu.

APROVADO EM _____/_____/_____CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Membro	Menção Atribuída
_____ **DARDANO DO NASCIMENTO MOTA - Maj** Cmt Curso e Presidente da Comissão	
_____ **EDUARDO BORDIGNON LUCCHINI - Cap** 1º Membro	
_____ **RAPHAEL ALVES DA SILVA - Cap** 2º Membro e Orientador	

_____
BRUNO ELIAS RIBEIRO – Cap
Aluno

O EMPREGO DE DISPOSITIVOS DE RF EM FOTÔNICA E SUAS VANTAGENS PARA O ÊXITO DA FUNÇÃO DE COMBATE COMANDO E CONTROLE

Bruno Elias Ribeiro[1]
Raphael Alves da Silva[2]

RESUMO

Os dispositivos fotônicos, em emprego conjunto a dispositivos eletrônicos ou em substituição a eles, trazem vantagens significativas para os sistemas que empregam radiofrequência. Neste sentido, este trabalho aborda o estado da arte da tecnologia de RF em Fotônica, abrangendo os dispositivos que se valem de radiofrequência, de relevância para a guerra eletrônica de não comunicações, que se beneficiam do uso desta tecnologia. Neste artigo, o uso da fibra óptica é destacado como vantagem, o que não exclui os demais benefícios não detalhados neste trabalho: redução de peso, redução da inserção de ruído por dispositivos eletrônicos adicionais, maior largura de banda, possibilidade de aumento da faixa dinâmica e imunidade a interferências eletromagnéticas. Em complemento, esta pesquisa apresenta de que forma o emprego da RF em Fotônica pode afetar a dimensão técnica da função de Combate Comando e Controle, bem como suas conseqüências para a arte do Comando e a ciência do Controle na condução das operações terrestres. Trata-se de assunto de relevância para as Comunicações e a Guerra Eletrônica no Exército Brasileiro, pois é uma tecnologia de interesse para a defesa, em estudo por outras nações e que se traduzirá em vantagem para a aquisição da consciência situacional em combate.
Palavras-chave: Guerra eletrônica. RF em fotônica. Comando e Controle.

ABSTRACT

Photonic devices, deployed along electronic devices or replacing them, bring significative advantages to radiofrequency systems. This way, this work presents state-of-art in Microwave Photonics technologies, including the radiofrequency systems that are relevant to electronic warfare in electronic intelligence activities, which benefit from these technologies. In this article, the use of optical fiber is named as an advantage, which does not exclude the other benefits not detailed in this work: weight loss, reduction of noise insertion due to additional electronic devices, higher bandwidth, possibilities in increasing the spurious free dynamic range and immunity to electromagnetic interference. Besides, this research presents how microwave photonics' deployment impacts technical dimension in Command and Control, as well as the consequences to the art of Command and science of Control in terrestrial operations. That's a relevant matter to Communications and Electronical Warfare in Brazilian Army, as relevant technology for defence, under research in other nations and profitable for situational awareness in combat.
Keywords: Electronic Warfare. Microwave Photonics. Command and Control.

---

[1]Capitão de Comunicações da turma de 2007 da AMAN. Mestre em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo ITA em 2016. Realizou o Curso Básico de Guerra Eletrônica em 2010 no CIGE, e o Curso Doutrinário de Guerra Eletrônica em 2012, na FAB.
[2]Capitão de Comunicações da turma de 2007 da AMAN. Especialista em Operações Militares pela EsAO em 2017. Realizou o Curso Básico de Guerra Eletrônica em 2013 no CIGE.

INTRODUÇÃO

O cenário de combate moderno é cada vez mais incerto. Contudo, é inegável que o uso de novas tecnologias busca a redução de tais incertezas, ampliando a consciência situacional e permitindo o exercício do comando e controle no amplo espectro dos conflitos.

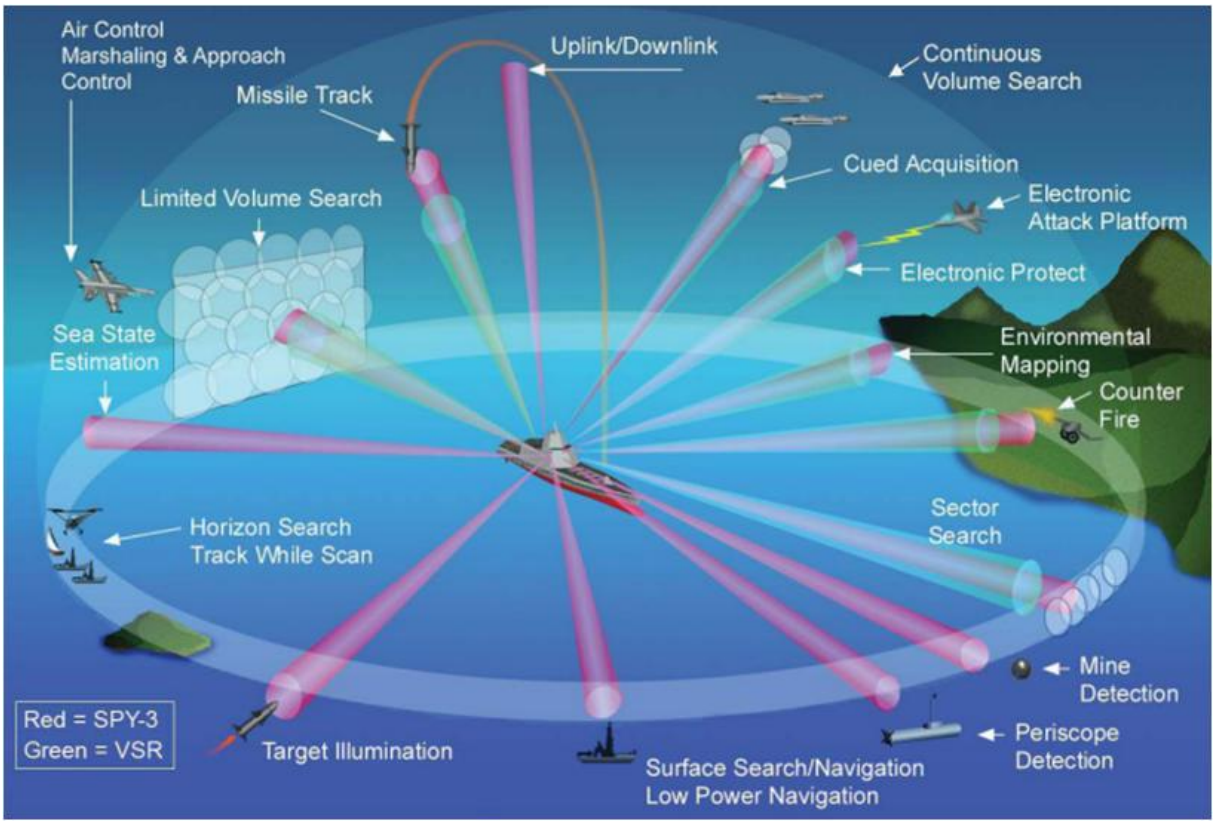

Figura 1 – Desafios no uso do espectro eletromagnético para a Consciência Situacional no Cenário de Combate Moderno. Fonte: BOGONI, A. **Phodir project: Photonic Based Fully Digital Radar System**. CNIT, TECIP, disponível em http://www.phodir.eu/phodir/file/presentation.pdf. Acessado em 03 Jun 18.

Na Figura 1 acima, verifica-se o emprego de sensores que atuam na obtenção da consciência situacional utilizando dispositivos distintos (com feixes representados nas cores vermelha e verde), de forma a detectar e contrapor-se às ameaças apresentadas no cenário considerado, oferecendo proteção a uma dada plataforma de combate. São aplicações que podem utilizar faixas diferentes do espectro eletromagnético e que demandam alta largura de banda instantânea para a proteção eficaz e oportuna daquela plataforma. Aproveitando o exemplo do radar, pode ser o caso de um dispositivo multifuncional como o da figura, capaz de detectar um alvo a grandes distâncias e, na medida em que se aproxima da

plataforma de combate, este alvo é acompanhado pelo mesmo radar, desempenhando agora a função de radar diretor de tiro de um sistema de armas.

Neste contexto, considerando a necessidade de maiores larguras de banda para obtenção da consciência situacional, a área de RF em Fotônica é promissora, assegurando aos sistemas de interesse para a guerra eletrônica (GE) a eficiência necessária ao cumprimento das novas demandas desses cenários de combate (RIDGWAY, 2014). Cenários como o apresentado na Figura 1 são cada vez mais comuns, dada a diversidade de sensores empregada em prol da consciência situacional.

Os conhecimentos sobre os adversários e oponentes, o sincronismo na execução das ações táticas e as novas tecnologias empregadas pelos sistemas de armas são decisivos para o êxito no emprego de forças militares no espaço de batalha (BRASIL, 2009, p. 1-1). As emissões de energia eletromagnética, de interesse para a GE, estão associadas aos sistemas que apoiam o emprego destas forças.

Estes sistemas compõem o C^4ISTAR – da sigla em inglês para comando, controle, comunicações, computador, inteligência, vigilância, aquisição de alvos e reconhecimento –, base e ponto de partida para a tomada de decisão em combate e integrantes da dimensão técnica da função de combate Comando e Controle (VISACRO, 2015, p. 73).

Para retomar as origens destes sistemas, vale lembrar que as tecnologias que empregam radiofrequência (RF) datam do século XIX (BRASIL, 2009, p. 1-2), tendo sido empregadas inicialmente para a troca de informações, como o caso do telégrafo, inventado em 1837 por Samuel Morse (KEISER, 2014, p. 2). Os estudos na área de RF evoluíram, chegando a outras faixas do espectro eletromagnético, com frequências a partir da faixa de micro-ondas. Surgiram aplicações como o MASER, que significa, na sigla em inglês, amplificação de micro-ondas por emissão estimulada de radiação (LASER, 2010). Tudo culminou na invenção do LASER, sigla em inglês para amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. Esta tecnologia foi apresentada no começo da década de 1960, e abrange os espectros de frequências do infravermelho, do visível e do ultravioleta (KEISER, 2014, p. 4).

Ao longo do tempo, em função das evoluções tecnológicas nas aplicações supracitadas, observa-se um aumento gradativo na frequência de operação dos sistemas de comunicações. Isto ocorre devido ao consequente aumento da

capacidade de transporte de informações, e está associado ao aumento da largura de banda com o aumento da frequência. Estas evoluções tecnológicas levaram, por exemplo, à criação do rádio, da TV, do radar e dos enlaces de micro-ondas (KEISER, 2014, p. 3).

Esta tendência de aumento da frequência de operação é vista especialmente nos dias atuais, em muitas aplicações de guerra eletrônica (GE). Os receptores devem interceptar e identificar rapidamente sinais eletrônicos de baixa potência em toda a faixa de RF, tarefa cada vez mais difícil para receptores convencionais – aqueles que se valem apenas de dispositivos eletrônicos (MARQUES et al, 2017, p. 32).

Seguindo esta tendência, a partir da década de 90, o setor civil e o setor militar passaram a empregar tecnologias para conversão do sinal de RF em sinal óptico. Conhecida como *Microwave Photonics*, ou RF em Fotônica, esta área se dedica ao emprego de dispositivos fotônicos para gerar e processar sinais na faixa espectral de RF, obtendo vantagens quando comparado ao emprego de dispositivos de eletrônica convencional (IEZEKIEL, 2009). Para os fins deste artigo, são tratados como dispositivos convencionais aqueles que fazem uso apenas de dispositivos eletrônicos para a geração, processamento e detecção de sinais de RF.

Constituem exemplos de vantagens dos dispositivos fotônicos sobre os dispositivos convencionais o aumento da largura de banda para a transmissão de sinais, a redução das dimensões e da dissipação de potência destes sistemas de micro-ondas e o emprego de circuitos mais leves, simples e imunes a interferências eletromagnéticas (GONÇALVES et al, 2015, p. 50).

Estas vantagens também são proporcionadas a aplicações militares de interesse para a GE. Um grupo de pesquisadores italianos apresentou o protótipo de um radar inteiramente fotônico, desde a geração estável da forma de onda até a detecção e o pós-processamento do sinal de RF (GHELFI et al, 2014). Outra aplicação possível é a conexão de um sítio de antenas de radares à estação de controle destes sensores por meio de fibra óptica, garantindo a operação remota das antenas e sem comprometer o processamento dos sinais de interesse (COUTINHO, 2011). Uma publicação da *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA), do Exército dos Estados Unidos da América (EUA), prevê o emprego de tecnologias de RF em Fotônica em receptores multifuncionais de guerra eletrônica, contemplando assim as necessidades de altas frequências de

operação, elevadas larguras de banda e elevada faixa dinâmica (RIDGWAY et al, 2014).

Por tudo isso, as tecnologias fotônicas tendem a ser empregadas em conjunto com dispositivos eletrônicos convencionais ou, eventualmente, em um futuro bem próximo, em substituição a eles, tendo em vista a aplicação tecnológica de interesse. No caso deste trabalho, o emprego pode ocorrer tanto em alvos da guerra eletrônica como nos próprios sistemas de guerra eletrônica, tendo em vista a obtenção da consciência situacional em combate.

1.1 PROBLEMA

Os sistemas de interesse para a GE, com alvos enquadrados tanto no campo das comunicações como no campo das não comunicações, apresentam historicamente a tendência de operar em frequências mais elevadas. Isto decorre da necessidade de maiores larguras de banda para a aquisição da consciência situacional em combate. Uma consequência desta demanda é a busca por maiores valores de faixa dinâmica para a operação destes sistemas.

Um exemplo deste tipo de sistema de interesse para a GE, no campo das não comunicações, já submetido a testes de campo, é o radar fotônico. Este dispositivo, idealizado por um grupo de pesquisadores italianos, utiliza fotônica desde a geração da frequência no espectro de RF até a detecção da forma de onda, passando pelo processamento do sinal, implicando em melhoria dos parâmetros de operação do radar e de suas figuras de mérito (GHELFI et al, 2014).

Considerando um cenário de combate convencional com espectro eletromagnético denso, quais vantagens poderão ser obtidas com o emprego de dispositivos fotônicos, em conjunto ou até mesmo em substituição aos dispositivos que empregam eletrônica convencional, tendo em vista ampliar a consciência situacional e, consequentemente, ser eficaz no exercício do comando e do controle nas operações?

1.2 OBJETIVOS

A fim de apresentar as vantagens obtidas com o emprego de dispositivos fotônicos em conjunto ou em substituição aos dispositivos eletrônicos convencionais em sistemas de RF de interesse para a Guerra Eletrônica, o presente estudo pretende analisar as soluções tecnológicas disponíveis ou em fase de pesquisa que podem favorecer a ampliação da consciência situacional no

cenário de combate moderno, no escopo da Função de Combate Comando e Controle, em especial dos radares, dispositivos de interesse e alvos para a guerra eletrônica de não comunicações.

Para viabilizar a consecução do objetivo geral de estudo, foram formulados os objetivos específicos, abaixo relacionados:

a. Apresentar exemplos de aplicabilidade das tecnologias de RF em Fotônica em sistemas de interesse para a guerra eletrônica de não comunicações;

b. Apresentar as pesquisas em fotônica para sistemas de RF como potencial fator de ganho para as operações executadas pelo Exército Brasileiro; e

c. Apresentar as vantagens deste tipo de tecnologia para o êxito das atividades afetas à função de combate Comando e Controle, em especial da guerra eletrônica de não comunicações.

1.3 JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

Sabe-se que os sistemas de interesse para a Guerra Eletrônica tendem a adquirir capacidades multifuncionais e, para atender a estas capacidades, faz-se necessário operar em frequências de operação mais elevadas que as habituais (RIDGWAY et al, 2014).

Isto ocorre por conta das demandas por maiores larguras de banda para a operação destes mesmos sistemas, tendência que também é encontrada em sistemas de interesse para o meio civil.

Além do aumento da frequência de operação e da largura de banda, faz-se necessário o aumento do valor de algumas figuras de mérito destes sistemas, como é o caso da faixa dinâmica livre de espúrios.

As tecnologias de RF em Fotônica, quando empregadas em sistemas de interesse para a Guerra Eletrônica, possibilitam a geração, a detecção e o processamento dos sinais em uma faixa espectral mais elevada que a faixa espectral de RF. Por tudo isso, as vantagens angariadas com a operação nesta faixa espectral mais elevada permitem o aumento na eficiência dos sistemas de interesse para a Guerra Eletrônica.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa se caracteriza por consultas às fontes bibliográficas técnicas científicas e institucionais, sendo a pesquisa executada pelo método exploratório.

Trata-se de uma pesquisa qualitativa, onde se buscam conhecimentos sobre o estado da arte nos sistemas que podem empregar dispositivos de RF em Fotônica. Neste sentido, busca-se destacar as vantagens angariadas com estes dispositivos em função do meio de transmissão comumente utilizado para seu emprego – a fibra óptica.

Em complemento, busca-se discutir a importância das tecnologias de RF em Fotônica para a Função de Combate Comando e Controle, bem como do impacto para sua dimensão técnica decorrente do emprego dos mesmos dispositivos supracitados em seus sistemas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresenta-se neste capítulo de que forma o emprego de dispositivos de RF em Fotônica pode impactar a Função de Combate Comando e Controle na obtenção da consciência situacional em combate, especificamente nos sistemas de interesse para a guerra eletrônica de não comunicações.

Para tanto, como resultados da pesquisa bibliográfica executada, serão abordados a seguir, de forma mais detalhada, a evolução da tecnologia de RF em Fotônica, o estado da arte do principal meio de transmissão utilizado e serão citadas outras vantagens relacionadas ao emprego desta tecnologia no âmbito das Forças Armadas. Na sequência, aborda-se a Função de Combate Comando e Controle associada aos melhoramentos impostos pela adoção de dispositivos fotônicos em sensores de interesse para a guerra eletrônica de não comunicações, abordando possíveis impactos para a consciência situacional e, consequentemente, para o Comando e Controle (C^2) no Exército Brasileiro. Finalmente, a seção destinada à discussão aborda perspectivas futuras para a tecnologia de RF em Fotônica.

3.1 RF EM FOTÔNICA

A área conhecida na literatura científica como *Microwave Photonics*, traduzida como RF em Fotônica para este estudo e em outros trabalhos científicos redigidos no Brasil (DIAS, 2017) e (SILVA, 2017), teve início a partir da junção das tecnologias usadas para o espectro de frequências ópticas e para o espectro de frequências de microondas (IEZEKIEL, 2009).

Uma das aplicações de interesse desta tecnologia de RF em Fotônica no meio civil e que obteve grande proveito comercial a partir do uso de dispositivos fotônicos foi a utilização de Enlaces Analógicos a Fibra Óptica (EAFO) para a distribuição de sinais de TV a Cabo. Outra aplicação dos EAFO, de interesse militar, é o uso de antenas remotas, afastadas da unidade de recepção e processamento de sinais de radar, de forma a prover segurança a estas instalações de recepção e processamento de sinais (COX III, 2004). Tanto na aplicação civil como na aplicação militar supramencionadas, o meio de transmissão utilizado é a fibra óptica, cujas vantagens serão abordadas a seguir.

Em um EAFO, um sinal de RF modula uma portadora óptica, caracterizando a conversão deste sinal do espectro de frequência de RF para o espectro de frequência óptica (COX III, 2004). Este sinal modulado pode ser transmitido utilizando como meio a atmosfera (FSO – *Free Space Optics* – Óptica no espaço livre) ou a fibra óptica. A transmissão ocorre até um fotodetector, onde é feita a transdução do espectro de frequência óptica para o espectro de frequência de RF, recuperando assim o sinal de RF que previamente modulara a portadora óptica (MARQUES et al, 2017).

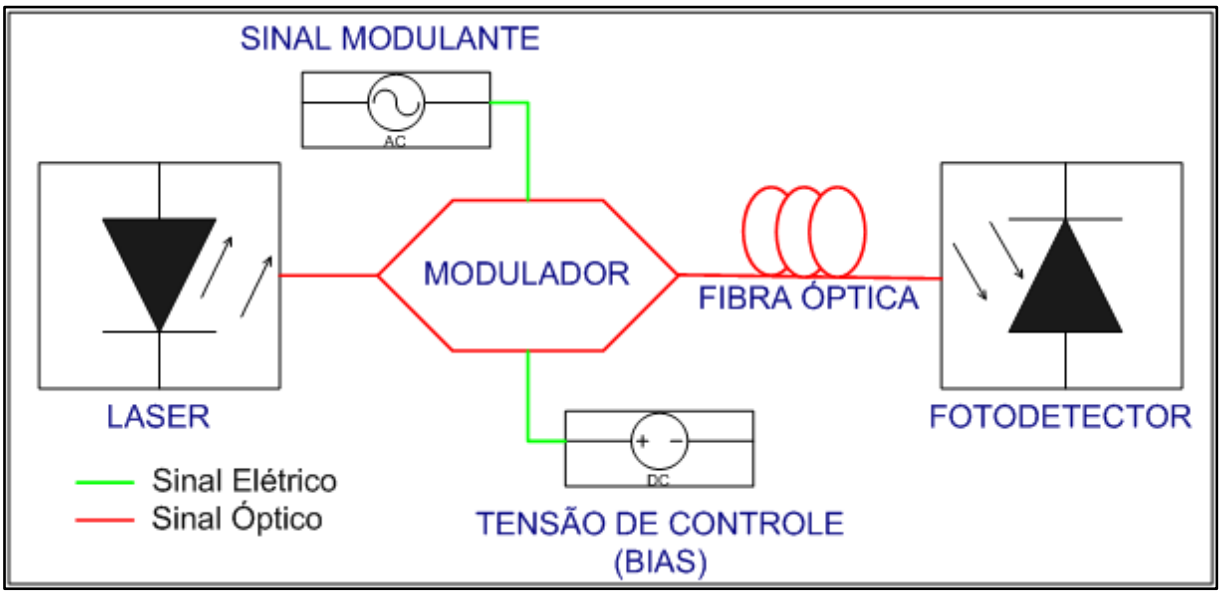

Figura 2 – Exemplo de EAFO. Esta é uma das possibilidades de enlace com dispositivos fotônicos para a transmissão de sinais de RF em Fibra Óptica. Fonte: O Autor.

A Figura 2 acima traz um exemplo de EAFO em sua configuração mais comumente empregada, utilizando modulação externa, transmissão por fibra óptica e detecção direta. É possível, com outras arquiteturas para o enlace, empregar modulação direta, que é feita sem o auxílio de um modulador externo adicional ao

enlace, ou detecção balanceada, empregando mais de um fotodetector, por exemplo (COX III, 2004).

Os dispositivos fotônicos do EAFO da Figura 2, unidos pelo caminho percorrido pelo sinal óptico na cor vermelha, são: o laser, que gera a frequência de onda portadora em uma faixa de frequência de centenas de THz; o modulador, que possibilita ao sinal de RF em uma faixa de dezenas de GHz modular a portadora laser; a fibra óptica, meio de transmissão do sinal modulado; e o fotodetector, que recebe em seu sensor óptico o sinal modulado e o converte em sinal de RF. Caso a modulação externa seja uma modulação de intensidade, obtida, por exemplo, a partir de um modulador eletroóptico de intensidade do tipo Mach-Zehnder (MZM – *Mach-Zehnder Modulator*), como o modulador representado no exemplo da Figura 2, o sinal de RF detectado será proporcional à intensidade óptica modulada incidente no fotodetector, possibilitando assim a recuperação do sinal de RF que modulara a portadora laser (COX III, 2004).

Os dispositivos eletrônicos do EAFO da Figura 2 compreendem o dispositivo de micro-ondas que gera o sinal modulante e o dispositivo que gera a tensão de controle do MZM. O sinal modulante provém de um gerador de sinais em corrente alternada (AC); este sinal elétrico AC tem seu caminho percorrido representado na cor verde. Também é representado na cor verde o caminho percorrido pelo sinal elétrico DC (Bias) utilizado para controlar o ponto ótimo de operação do modulador eletroóptico utilizado no enlace.

No contexto da Figura 2, o sinal de RF (sinal modulante AC) pode ser substituído, em uma aplicação operacional, por um sinal de micro-ondas proveniente da central de controle de um radar de busca, operando a uma frequência de dezenas de GHz. Este sinal modula uma portadora laser e é transmitido por fibra óptica para uma antena a dezenas de quilômetros de distância, situada na saída do fotodetector utilizado no EAFO. O sinal de RF segue até o alvo e a informação do alvo retorna a outro fotodetector. Após a fotodetecção, o tratamento e o pós-processamento do sinal de RF, de volta à estação controladora remota, permitem a adequada interpretação da informação referente ao alvo do radar. Neste exemplo, o EAFO se mostra vantajoso por permitir a operação protegida de um radar, cuja antena está em um sítio a dezenas de quilômetros de distância da central de controle, proporcionando um mínimo de atenuação ao enlace por conta do meio de transmissão empregado – a fibra óptica (COUTINHO, 2011).

Cabe ressaltar que o próprio sinal AC não precisa, necessariamente, ser gerado por dispositivos convencionais, como ocorre com os radares comercializados hoje em dia. Algumas técnicas em estudo já permitem, por exemplo, a geração de sinais de RF estáveis, na faixa de micro-ondas, a partir do batimento de duas frequências fixas no espectro de frequências do infravermelho, ou seja, empregando dois lasers de frequências fixas ou sintonizáveis (BOGONI).

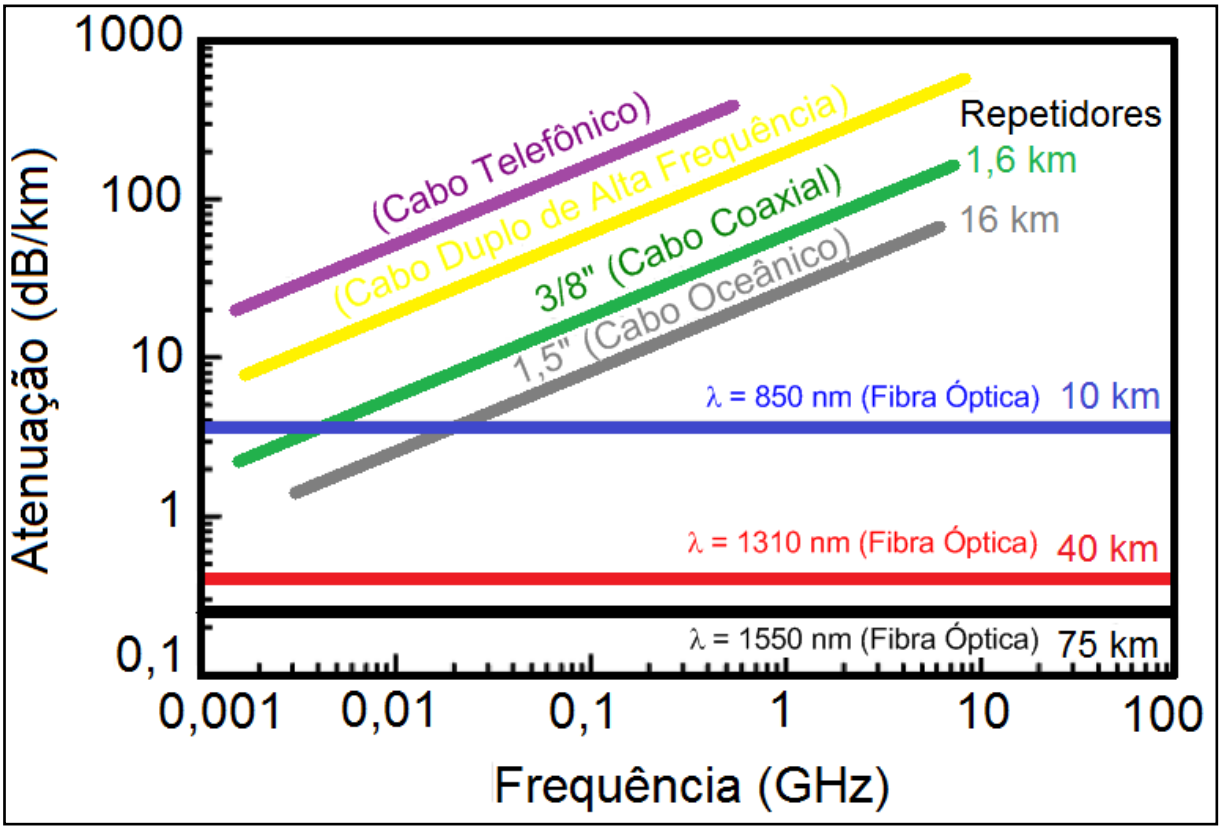

Figura 3 – Comparação entre atenuações na Fibra Óptica e em outros meios de transmissão. Fonte: Adaptado de COX III, C. H. **Analog Optical Links: Theory and Practice**. Nova York: Cambridge University Press, 2004. 288 p.

A Figura 3 compara diversos meios de transmissão e mostra porque a fibra óptica como meio de transmissão é mais vantajosa que um cabo coaxial a longas distâncias. No eixo das ordenadas do gráfico da Figura 3 estão expressos os valores em dB/km das atenuações de cada meio de transmissão. Verifica-se que, com o aumento da frequência de operação, expresso no eixo das abscissas de 1 MHz a 100 GHz, o aumento da atenuação em um cabo coaxial (linha verde) acompanha o aumento da frequência de RF a ser transmitida, ao passo que a atenuação imposta pelas fibras ópticas (linhas azul, vermelha e preta) se mantém em um patamar muito inferior, praticamente constante para a faixa de frequência de RF observada. Para o comprimento de onda de 1550 nm, por exemplo, será necessário empregar um repetidor para recompor o sinal original após este sinal

percorrer 75 km de distância; é necessário repetir o sinal de RF a cada 1,6 km no emprego do cabo coaxial e a cada 16 km no emprego do cabo metálico oceânico.

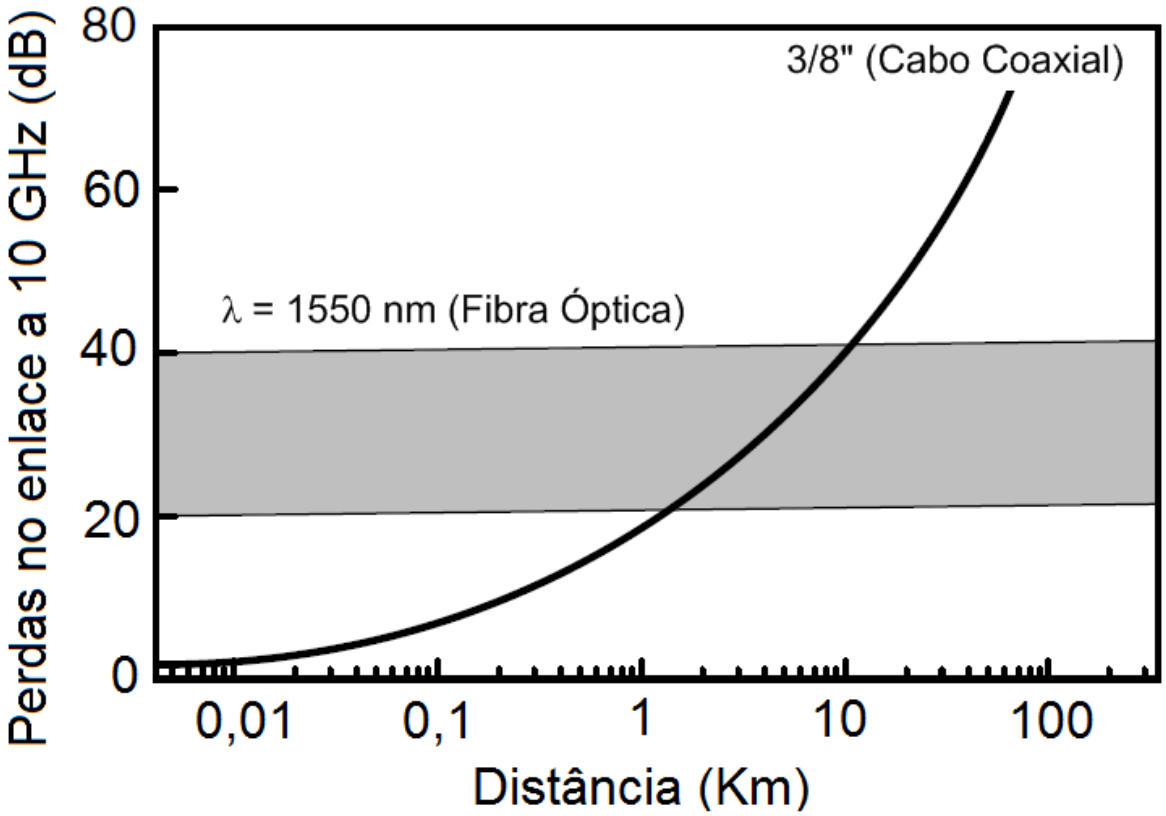

Figura 4 – Comparação entre atenuações na Fibra Óptica e no Cabo Coaxial na transmissão de um sinal de 10 GHz. Fonte: Adaptado de COX III, C. H. **Analog Optical Links: Theory and Practice**. Nova York: Cambridge University Press, 2004. 288 p.

A Figura 4 também mostra o comportamento da atenuação na transmissão de sinais de RF, desta vez conforme a distância a ser percorrida pelo sinal de RF. Observa-se que o cabo coaxial tem bom desempenho em distâncias inferiores a 1 km. Contudo, na medida em que a distância para transmitir o sinal de RF aumenta, a partir de 10 km de distância do emissor, a opção pela transmissão por fibra óptica, em especial no comprimento de onda de 1550 nm, garante uma atenuação menos impactante para a frequência de 10 GHz. Para contextualizar, este valor de 10 GHz está próximo ao valor de frequências empregadas por radares diretores de tiro e radares de vigilância terrestre.

Uma alternativa à fibra óptica para a transmissão da portadora laser modulada é por meio de enlaces FSO, mas que são comumente empregados a curtas distâncias, para transmissão de dados em redes metropolitanas locais e demandando alinhamento e visada direta entre o transmissor e o receptor. É outra técnica que tira proveito da elevada largura de banda proporcionada pela operação na faixa de frequência de centenas de THz. Contudo, para o escopo deste trabalho,

o emprego da fibra óptica é mais adequado à transmissão dos sinais de radar, já que o comprimento de onda diminuto do laser, em sua propagação pela atmosfera, é suscetível a atenuações provenientes de partículas de poeira e gotículas de água que se interponham entre a fonte e o detector (SANTOS, 2008).

Além das vantagens atinentes ao canal de transmissão utilizado para a transmissão dos sinais de RF, o emprego da portadora no espectro de frequências de laser traz como benefício o aumento da largura de banda. Neste caso, o emprego de dispositivos fotônicos possibilita o uso do canal para a transmissão de outros sinais de RF, aplicação de interesse para os receptores multifuncionais (RIDGWAY et al, 2014). Um exemplo de aplicação prática deste tipo de receptor é o sistema de uso dual proposto e testado pelo Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL) em parceria com os pesquisadores do radar fotônico italiano (MELO, 2016). Neste sistema que utiliza dispositivos fotônicos, propõe-se uma arquitetura que comporte simultaneamente um radar e um dispositivo de comunicações utilizando um único elemento irradiador de RF sem, contudo, prejudicar o seu desempenho global. Este sistema traz ainda outra vantagem: o uso de uma antena e de um transceptor para as duas aplicações, radar e comunicações.

Aplicações como esta possibilitam a redução de custo, tamanho, peso e consumo de potência do sistema (MELO, 2016), características extremamente desejáveis para que este tipo de sensor, dotado de dispositivos fotônicos, possa ser embarcado, por exemplo, em um sistema de aeronave remotamente pilotada (SARP).

Outras iniciativas nacionais também abarcam o contexto de interesse da guerra eletrônica de não comunicações, na área de RF em Fotônica. Como exemplos de pesquisa nesta área, aplicada à defesa nacional, pode-se citar a pesquisa sobre o ruído de fase na geração fotônica de sinais de RF (DIAS, 2017); pesquisa sobre filtros e linhas de retardo fotônicos para emprego em antenas de arranjo de fase (PAA – *Phased Array Antennas*) (SILVA, 2017); e a pesquisa sobre otimização da faixa dinâmica livre de espúrios em EAFO (RIBEIRO, 2016). Nestes trabalhos, conduzidos pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), busca-se a aplicação operacional das pesquisas de RF em Fotônica no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, uma vez que são assuntos de interesse para o desenvolvimento da ciência e da tecnologia no âmbito das Forças Armadas Brasileiras.

Algumas aplicações militares já são vislumbradas a partir das vantagens proporcionadas pela RF em Fotônica, empregando dispositivos fotônicos em conjunto ou em substituição a dispositivos eletrônicos. Um dos exemplos já citados neste trabalho corresponde ao radar fotônico, denominado projeto PHODIR – *Photonic Based Fully Digital Radar System* (BOGONI). Seguindo esta mesma tendência, foi noticiado que a Rússia dispõe de aparato semelhante, com o projeto ROFAR – *Active Phased Array Radio Photonics* (THAI, 2016), que prioriza o uso destes dispositivos na geração de diagramas de radiação em PAA. A China também se empenha nas pesquisas na área de RF em Fotônica, tendo em vista os recentes resultados divulgados no renomado periódico científico “Nature: Scientific reports” (ZHANG, 2017).

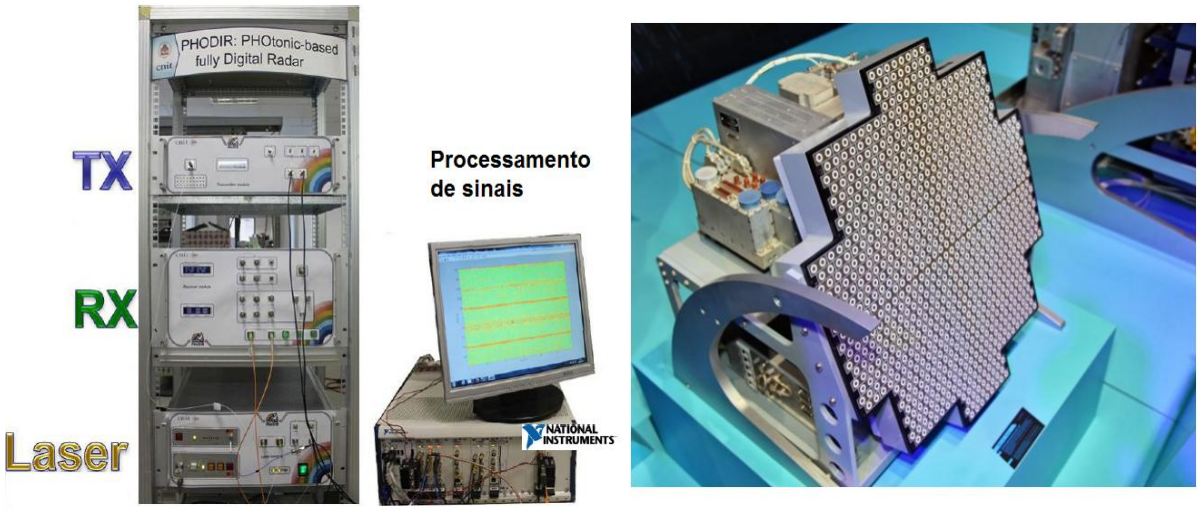

Figura 5 – Radar fotônico italiano (PHODIR) à esquerda e radar fotônico russo (ROFAR) à direita. Fontes: adaptado de BOGONI, A. **Phodir project: Photonic Based Fully Digital Radar System**. CNIT, TECIP, disponível em http://www.phodir.eu/phodir/file/presentation.pdf. Acessado em 03 Jun 18. Adaptado de THAI Military and Asian Region - **Zhuk-AE/FGA-35 modified radar with AESA (ROFAR)**. Disponível em <https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/2016/03/14/kret-creates-a-laboratory-forresearch-in-photonics/> Acesso em: 31 julho 2018.

Especificamente em sistemas de guerra eletrônica, dois pesquisadores iranianos propuseram um receptor de alerta radar (*Radar Warning Receiver* - RWR) que emprega tecnologia IFM (*Instantaneous Frequency Measurement*), aplicação que é comumente empregada com dispositivos convencionais. Neste artigo, o RWR do tipo IFM utiliza dispositivos fotônicos para a autoproteção de plataformas de combate (EMAMI, 2014), conceito associado à guerra eletrônica de não comunicações.

Verifica-se, assim, que os dispositivos fotônicos, dentre as tecnologias de RF em Fotônica, permeiam os sistemas que são de interesse para a defesa, em

especial aqueles de interesse para a guerra eletrônica de não comunicações. Verifica-se, ainda, o emprego destes dispositivos fotônicos em conjunto ou em substituição a dispositivos convencionais de forma a melhorar o desempenho dos sistemas em que estão inseridos.

3.2. FUNÇÃO DE COMBATE COMANDO E CONTROLE

Vistas as informações sobre as tecnologias de RF em Fotônica, qual será seu provável impacto na função de combate comando e controle para o suporte aos cenários de combate da era da informação?

Conforme o manual de campanha de Comando e Controle, “o C² envolve três componentes imprescindíveis e interdependentes: a autoridade, o processo decisório e a estrutura” (BRASIL, 2015). No contexto deste trabalho, verifica-se que a adoção de dispositivos fotônicos em conjunto ou em substituição a dispositivos convencionais atua diretamente no terceiro componente, a estrutura, por proporcionar um aprimoramento das tecnologias essenciais ao exercício do C².

Estas tecnologias estão presentes nos sensores destinados a prover consciência situacional – no caso deste artigo, radares e receptores de guerra eletrônica de não comunicações. Logo, o processo decisório também será impactado – já que pode afetar a percepção a partir de mudanças na consciência situacional – bem como o exercício da autoridade por parte do decisor (BRASIL, 2015), interferindo no C² de um determinado Teatro de Operações (TO).

Ainda no contexto da Função de Combate Comando e Controle, o impacto no processo decisório também se relaciona à execução do Ciclo OODA, sigla que denota as ações de Observar, Orientar, Decidir e Agir (BRASIL, 2015). Como o ciclo é executado tanto pelas Forças Amigas como pelas Forças Oponentes presentes no TO, a iniciativa das ações e, portanto, a ofensiva, sempre priorizada e buscada pela doutrina de emprego do Exército Brasileiro, beneficiará aquele que efetivamente completar o ciclo OODA primeiro.

Para que isto ocorra, contudo, a consciência situacional efetiva sobre o cenário de combate deve ser atingida antecipadamente, o que permitirá ao decisor exercer sua autoridade com oportunidade, obrigando o decisor oponente a interromper e reiniciar a execução de seu ciclo OODA para tentar retomar a iniciativa das ações (BRASIL, 2015).

No mesmo sentido, a adoção de dispositivos fotônicos em conjunto ou em substituição a dispositivos eletrônicos, ao melhorar o desempenho dos sensores vocacionados à obtenção da consciência situacional, também permite o refinamento da observação e da orientação dentro do ciclo OODA. Resta ao comandante do TO, tendo por base os produtos originados nas primeiras duas fases do ciclo, decidir e agir com oportunidade de forma a obter a iniciativa das ações e, consequentemente, a ofensiva (BRASIL, 2015).

Aproveitando o exemplo do transceptor de uso dual – radar e comunicações – citado na seção anterior, em um cenário de Guerra Centrada em Redes (GCR), as informações produzidas por este tipo de sensor têm condições de orientar o decisor com maior oportunidade. O sistema de radar aliado ao sistema de comunicações, além de apresentar os dados de interesse para o planejamento das ações de forma oportuna, permite sua integração a outros tipos de sensores, inclusive outros radares, de forma a refinar o resultado apresentado. Em um cenário complexo como o apresentado na Figura 1 deste artigo, esta integração amplia a consciência situacional, “de modo a contribuir para a obtenção da superioridade de informação e da iniciativa” (BRASIL, 2015), aumentando assim as probabilidades de êxito no processo decisório por parte do comandante, impactando sobremaneira o êxito da Função de Combate Comando e Controle.

3.3 DISCUSSÕES

Verifica-se que a adoção de dispositivos alinhados com as tecnologias de RF em Fotônica, seja ela em conjunto ou em susbstituição a tecnologias de eletrônica, pode ser benéfica ao processo decisório de C^2. É válido, portanto, discutir sobre o emprego desta tecnologia no âmbito do Exército Brasileiro, uma vez que já existem outros atores no cenário Nacional conduzindo esta pesquisa aplicada à Defesa.

Cumpre aqui ressaltar que os benefícios do emprego de dispositivos fotônicos não estão restritos aos meios de transmissão, como o exemplo da fibra óptica, explorada com maior riqueza de detalhes e escolhida, no escopo deste artigo, para denotar as melhorias dos sistemas em comparação aos dispositivos eletrônicos convencionais. Sabe-se que “sistemas futuros tenderão a ser projetados originalmente no domínio da fotônica, que não servirá simplesmente de substituto (...) como cabos coaxiais” (MARQUES et al, 2017).

Os dispositivos convencionais, na faixa de frequência pretendida para o

emprego de receptores multifuncionais (a partir de 40 GHz, até 100 GHz) contam ainda com a restrição do ruído de fase, dificultando a detecção acurada para as aplicações em faixas de frequências mais elevadas (GHELFI et al, 2014). Isso se deve ao pré-processamento e ao pós-processamento de sinais, evidenciados na necessidade de estágios de elevação de frequência e misturadores, essenciais ao refinamento dos sinais de interesse para os sistemas em estudo, uma vez que eles demandam a adição de novos dispositivos eletrônicos ao circuito. Além de aumentar a probabilidade de interferência eletromagnética entre os componentes eletrônicos empregados, estes componentes adicionados ao circuito eletrônico convencional degradam a relação sinal-ruído, reduzindo a eficácia destes sistemas (DIAS, 2017).

Para solucionar este problema do ruído de fase, a adoção de dispositivos fotônicos garante a imunidade a interferências eletromagnéticas e permite o tratamento do sinal de interesse no espectro de frequências do laser, diminuindo a relevância deste ruído para o aumento da frequência de operação de RF (BOGONI).

A detecção acurada do sinal de RF de interesse é fundamental em uma aplicação operacional de não comunicações, já que os sinais espúrios trazem como conseqüências aos radares e aos receptores de GE desde a apresentação de alvos falsos, em níveis de potência inferiores, até a saturação do receptor em níveis de potência mais elevados, onde não será possível distinguir qualquer tipo de alvo para aquele sensor. Esta é a importância da faixa dinâmica livre de espúrios neste contexto, tendo em vista que ela é delimitada em níveis de potência inferiores pela sensibilidade do receptor e em níveis de potência superiores pela faixa de saturação do receptor (RIBEIRO, 2016). Esta figura de mérito ainda é estudada na literatura científica e está relacionada ao desempenho dos dispositivos fotônicos em EAFO, tendo em vista melhorias no processamento do sinal de RF.

Outra vantagem é a possibilidade de integração destes dispositivos fotônicos em módulos multifuncionais, tendo como perspectiva futura aplicações similares às da fotônica em silício (BOGONI). Será possível, nesse sentido, reduzir ainda mais o peso e as dimensões destes sistemas, favorecendo seu emprego em Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARP) e até mesmo em vetores espaciais.

Exemplos como o do transceptor dual proposto pelo INATEL (MELO, 2016) mostram que existem institutos nacionais de Ciência e Tecnologia de referência a

par da relevância dos dispositivos que empregam RF em Fotônica para melhorar a capacidade dos sistemas eletrônicos convencionais.

Trata-se, por fim de pesquisa atual e relevante, que traz impacto para a doutrina de C^2 e que vem sendo acompanhada pelo Exército Brasileiro, uma vez que seu Departamento de Ciência e Tecnologia disponibilizou oficiais de seus quadros para fazer parte desta linha de pesquisa que já é contemplada pela Força Aérea Brasileira, no escopo de defesa nacional, e por outros institutos como o INATEL.Como pesquisa aplicada à defesa nacional, uma solução possível é a busca pela cooperação entre estes institutos e algumas empresas nesta área de RF em Fotônica ou dispositivos fotônicos para o desenvolvimento da Base Industrial de Defesa, bem como o acompanhamento das novas evoluções tecnológicas afetas a esta linha de pesquisa. Conforme visto anteriormente, a pesquisa nesta área também é conduzida por outros países com indústrias de defesa tradicionais, como a Itália e a Rússia, e emergentes, como é o caso da China – apenas para ilustrar a importância atribuída a esta tecnologia.

Todo o exposto comprova que as tecnologias de RF em Fotônica tendem, em um futuro próximo, a substituir os sistemas convencionais, dadas as vantagens obtidas com a adoção dos dispositivos fotônicos. Esta tecnologia, ao ser disponibilizada comercialmente em sistemas militares de interesse da guerra eletrônica, como o radar fotônico, por exemplo, permitirá ao contendor que a dominar vantagem considerável na aquisição da consciência situacional em combate, assegurando o êxito da dimensão técnica da Função de Combate Comando e Controle.

4 CONCLUSÃO

Verifica-se que, no contexto da adoção de dispositivos fotônicos, em conjunto com dispositivos eletrônicos e, em um futuro bem próximo, em substituição a eles, muitas são as vantagens obtidas para os sensores de comunicações e guerra eletrônica. Conforme apresentado nas seções anteriores, os radares, sensores de não comunicações e alvos para a guerra eletrônica de não comunicações, já protagonizam esta evolução na Itália, na Rússia e na China. Os EUA têm feito suas pesquisas no sentido de desenvolver receptores multifuncionais empregando RF em Fotônica, pesquisa esta que também é conduzida pelo INATEL, no Brasil.

Estas vantagens são apresentadas a partir da operação em frequências mais elevadas que as usuais, assegurando maior definição dos alvos a serem detectados e garantindo maiores valores de largura de banda. Isto se deve, em especial, à transmissão do sinal e ao seu processamento em frequências do espectro do infravermelho (laser). Frequências que só seriam possíveis com a adição de dispositivos eletrônicos convencionais, aumentando o peso, o custo e a complexidade dos sistemas e, da mesma forma, a inserção do ruído de fase, são viáveis, de forma estável e com menor degradação da relação sinal ruído, com o emprego de dispositivos fotônicos. Além das vantagens angariadas com a fibra óptica como meio de transmissão, assegura-se aos sistemas redução de peso, imunidade a interferências eletromagnéticas, bem como redução no consumo de potência.

As iniciativas para a pesquisa na área de RF em Fotônica aplicada à Defesa Nacional já são, desta forma, conduzidas por institutos nacionais de renome, como é o caso do INATEL e do ITA. Esta área já é considerada relevante para o Exército Brasileiro, tendo em vista a recente disponibilização de oficiais da Arma de Comunicações para a execução de pesquisas de pós-graduação *stricto sensu* em assuntos correlatos.

Alinhada à evolução e ao crescimento da dimensão técnica da Função de Combate Comando e Controle, a tecnologia de RF em Fotônica busca atender às necessidades de maiores larguras de banda dos sistemas onde é empregada, tendo em vista a tão almejada consciência situacional nos cenários de combate modernos.

Sabe-se que a consciência situacional nestes cenários é essencial ao êxito da dimensão técnica da Função de Combate Comando e Controle. Nesse sentido, é possível assegurar ao comandante a iniciativa das ações e, consequentemente, a ofensiva, tendo em vista que a execução do ciclo OODA com maior agilidade que por parte de seu oponente garante maior vantagem à sua execução.

Por fim, cabe ressaltar que os esforços nesta área de pesquisa não serão infrutíferos. As tecnologias de RF em Fotônica se mostram como decisivas para o futuro da Função de Combate Comando e Controle e para o êxito das operações, garantindo às Forças Armadas e ao Exército Brasileiro consciência situacional e capacidade de exercer a ciência do controle e a arte do comando quando necessário para garantia da Defesa Nacional e dos interesses constitucionais.

REFERÊNCIAS

BOGONI, A. **Phodir project: Photonic Based Fully Digital Radar System**. CNIT, TECIP, disponível em http://www.phodir.eu/phodir/file/presentation.pdf. Acessado em 03 Jun 18.

BRASIL. Exército. **C 34-1: Emprego da Guerra Eletrônica**. 2. ed. Brasília, DF, 2009.

_____. Exército. **EB20-MC-10.205: Manual de Campanha de Comando e Controle**. 1. ed. Brasília, DF, 2015

COUTINHO, O. L. et al. **Uso de redes de comunicações ópticas para transmissão e distribuição de emissores radar**. XIII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa – SIGE, 2011.

COX III, C. H. **Analog Optical Links: Theory and Practice**. Nova York: Cambridge University Press, 2004. 288 p.

DIAS, P. E. S. **Estudo do Ruído de Fase na Geração Fotônica de Sinais de RF: Modelagem e Caracterização**. 2017. 194f. Dissertação de Mestrado em Microondas e Optoeletrônica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

EMAMI, H.; ASHOURIAN, M. Improved Dynamic Range Microwave Photonic Instantaneous Frequency Measurement Based on Four-Wave Mixing. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 62, n. 10, p. 2462-2470, Out. 2014.

GHELFI, P. et al. A fully photonics-based coherent radar system. Research Letter. **Nature,** v. 507, p.341–345, Mar. 2014.

GONÇALVES, A.P. et al. Emprego da *Microwave Photonics* no cenário naval. **Passadiço**, v. XXVIII, n. 35, p. 50–53, 2015.

IEZEKIEL, S. E. **Microwave Photonics: Devices and Applications**. Reino Unido: John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 342 p.

KEISER, G. Comunicações por fibras ópticas. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2014. 659 p.

LASER FEST – **Celebrating 50 years of laser innovation – Early story**. Disponível em < http://www.laserfest.org/lasers/history/early.cfm>. Acessado em 04 Nov 2017.

MARQUES, R. B. et al. Perspectivas de modernização em guerra eletrônica: aplicação militar da fotônica. **Spectrum**, v. 1, n. 20, p. 32–38, Set. 2017.

MELO, S. et al. **Dual-use System Combining Simultaneous Active Radar & Communication, Based on a Single Photonics-Assisted Transceiver**. 17th International Radio Symposium – IRS, 2016.

RIBEIRO, B. E. **Otimização da Faixa Dinâmica Livre de Espúrios de um Enlace Analógico a Fibra Óptica**. 2016. 98f. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

RIDGWAY, R. W. et al. Microwave photonics programs at DARPA. **Journal of Lightwave Technology,** v. 32, n. 20, p. 3428-3439, Out. 2014.

SANTOS, L.B. **Análise de Sistemas de Comunicação Utilizando Óptica no Espaço Livre**. 2008. 133f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. Disponível em http://www.pgee.ime.eb.br/pdf/leandro_santos.pdf. Acesso em: 31 julho 2018.

SILVA, J. L. B. **Filtros e linhas de retardo fotônicos integrados aplicados a sistemas de RF em Fotônica**. 2017. 144f. Dissertação de Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

THAI Military and Asian Region - **Zhuk-AE/FGA-35 modified radar with AESA (ROFAR)**. Disponível em <https://thaimilitaryandasianregion.wordpress.com/ 2016/03/14/kret-creates-a-laboratory-forresearch-in-photonics/> Acesso em: 31 julho 2018.

VISACRO, A. Superando o caos – A função de combate comando e controle além da tecnologia da informação. **Military Review**, p. 70–87, julho-agosto 2015.

ZHANG, F. et al. Photonics-based real-time ultra-high-range-resolution radar with broadband signal generation and processing. **Nature: Scientific reports**. DOI:10.1038/s41598-017-14306-y. Outubro 2017. Acesso em 31 JUL 18.