

CONHECIMENTOS DE INTERESSE DA DOUTRINA SOBRE ANTENAS, RADIOPROPAGAÇÃO E TECNOLOGIA DE RÁDIOS HF NO EMPREGO DAS COMUNICAÇÕES EM OPERAÇÕES NA SELVA NA ERA DA INFORMAÇÃO

DOCTRINAL POINTS OF INTEREST COVERING ANTENNAS, THE PROPAGATION OF RADIO WAVES, AND HIGH FREQUENCY RADIO TECHNOLOGY IN THE EMPLOYMENT OF COMMUNICATIONS DURING JUNGLE OPERATIONS IN THE INFORMATION AGE

MAURÍCIO HENRIQUE COSTA DIAS¹
FELIPE DRUMOND MORAES²

RESUMO

As hipóteses de emprego na Amazônia têm em comum a necessidade de operar em ambiente de selva, bioma onipresente na região. Um dos principais óbices para as operações nesse cenário é a dificuldade de comunicações, muito dependente do meio rádio, seja via satélite, seja por rádios HF. Este trabalho discute potenciais conhecimentos de interesse da doutrina para a atualização das publicações doutrinárias referentes ao emprego das Comunicações por rádio HF em operações na selva. Para tal, os procedimentos adotados na prática pelas OM mais diretamente envolvidas com operações na selva foram identificados e analisados. Mais ainda, foram apresentados e discutidos conceitos técnicos pertinentes, levando em consideração o estado da técnica dos rádios da atual geração, bem como o estado da arte referente às antenas e à modelagem da propagação de ondas em ambiente de floresta. Além dos conhecimentos de potencial interesse doutrinário discutidos, complementares ao constante nos manuais, destaca-se ainda como resultado deste trabalho a confirmação da hipótese de desatualização da doutrina vigente correlata. Por fim, verificou-se também que a comunicação por rádio HF continua percebida como indispensável às operações na selva, mesmo quando a comunicação via satélite é disponibilizada.

Palavras-chave: Comando e Controle. Comunicações. Doutrina. Operações na Selva. Rádio HF.

ABSTRACT

The hypotheses of employment in the Amazon have in common the need to operate in the ubiquitous jungle biome. One of the main obstacles to the operations in this scenario is the difficulty of communications, very dependent on HF or satellite radio. In this work, the main goal was to discuss potential knowledge of interest to the doctrine in order to help updating the current publications relating to the use of HF radio communications in jungle operations. For this purpose, the procedures adopted in practice by the military organizations more directly involved with operations in the jungle were identified and analyzed. Moreover, some relevant technical concepts were presented and discussed, taking into account the state of the technique of the current generation radios as well as the state of the art relating to antennas and modeling of wave propagation in forests. Besides the complementary knowledge of potential interest to the doctrine discussed in this work, another result that stands out is the confirmation of the hypothesis that the related current doctrine is outdated. Finally, it was also corroborated that communication by HF radio is still perceived as essential to operations in the jungle, even when satellite communication is available.

Keywords: Command and Control. Communications. Doctrine. HF Radio. Jungle Operations.

¹ Instituto Militar de Engenharia (IME) - Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

E-mail: <mhcdias@ime.br>

Professor do Instituto Militar de Engenharia (IME)

Pós-Doutor pelo Institut Polytechnique de Grenoble - França.

² Batalhão Escola de Comunicações (BEsCom) - Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

Doutor em Ciências Militares (ECEME)

I INTRODUÇÃO

A Amazônia Brasileira é uma área com grande potencial de riquezas minerais e biodiversidade, o que desperta a atenção internacional há muitos anos. Garantir a presença do Estado nessa região é, pois, de interesse estratégico.

A partir do fim da década de 1980, observa-se um incremento da importância da Amazônia Brasileira como foco das ações de planejamento do Exército Brasileiro (EB). Ações ligadas ao narcotráfico nas fronteiras com países vizinhos, bem como uma crescente preocupação da opinião pública internacional com as questões ambientais foram alguns dos fatores de pressão que motivaram uma mudança de rumos relevante àquela época.

Pode-se afirmar que o cenário prospectivo levantado pelo EB para aquela região foi paulatinamente ganhando força nos níveis decisórios mais altos do poder. De fato, no modelo atual de gestão das questões de Defesa do Brasil, a preocupação com a Amazônia está presente de forma explícita nos documentos de referência de nível mais alto: a Política Nacional de Defesa – PND (BRASIL, 2013b) e a Estratégia Nacional de Defesa – END (BRASIL, 2013a). A END, em especial, é bastante explícita quanto à importância estratégica da Amazônia, e destaca a necessidade de formação de um combatente de selva detentor de qualificação e de rusticidade adequadas ao ambiente hostil daquela região (BRASIL, 2013a).

No contexto das operações realizadas pela Força Terrestre (F Ter), Operações na Selva são aquelas realizadas por uma força de qualquer escalão no cumprimento de uma missão tática, cuja área de emprego esteja predominantemente coberta pela floresta tropical úmida (BRASIL, 1997c). O apoio ao combate em operações na selva requer atenção especial quanto às necessidades de comunicações. A descentralização das ações e o grande afastamento dos elementos de manobra aumenta significativamente essa demanda (BRASIL, 1997c). O meio rádio é fundamental nesse contexto, dadas as limitações de emprego de outros meios de comunicação nesse ambiente, em particular o meio físico (BRASIL, 1997a).

A comunicação rádio via satélite é bastante recomendável, quando possível, mas via de regra, o meio mais confiável disponível é o rádio em HF. De fato, como prescrito nas Instruções Provisórias sobre Operações na Selva (BRASIL, 1997c), as comunicações rádio em HF crescem de importância, inclusive para os menores escalões, como grupo de combate, pelotão e companhia de fuzileiros, justamente por sua maior eficiência na área de selva.

A Doutrina Militar Terrestre – DMT incorpora conhecimentos teóricos e relacionados à tecnologia de rádios HF identificados ao longo das décadas de 1970 e 1980, como se constata nos manuais do EB pertinentes (BRASIL, 1997a; 1997b; 1997c). Ainda assim, isso não

significa que os óbices da comunicação rádio nas operações na selva tenham sido resolvidos definitivamente. De fato, a limitação imposta pela selva é de ordem física, e como tal, não pode ser mudada. Depende-se, portanto, de avanços tecnológicos no desenvolvimento de rádios que consigam atenuar cada vez mais os efeitos da vegetação densa, permitindo que se estabeleçam comunicações o mais confiáveis possível com os equipamentos disponíveis.

Uma importante quebra de paradigma na tecnologia de rádios ocorreu na década de 1990: a *digitalização das comunicações*. Algumas melhorias de desempenho geral passaram a ser apregoadas para os rádios militares, como a robustez da fonia digital ou o estabelecimento automático de enlace (ALE – *Automatic Link Establishment*) em rádios HF, para citar apenas duas (HARRIS CORPORATION, 2000; 2005). Mais recentemente, o conceito de *Rádio Definido por Software* – RDS (TUTTLEBEE, 2002) ampliou o rol de melhorias potenciais de desempenho dos rádios, inclusive no escopo das comunicações militares.

A percepção que se tem, entretanto, a partir da leitura dos manuais vigentes, é que os ganhos potenciais da digitalização dos rádios ainda não foram plenamente absorvidos no contexto da doutrina de emprego das comunicações, e mais notadamente no apoio às operações na selva. É preciso destacar que um trabalho considerável de reformulação doutrinária geral encontra-se em andamento, dentro do contexto atual do Processo de Transformação do Exército. Atualmente, o esforço do Centro de Doutrina do Exército (C Dou Ex) está concentrado na geração dos manuais dos dois níveis mais altos: fundamentos e concepções (BRASIL, 2012b; 2014b). Na sequência, espera-se que as publicações doutrinárias de 3º e 4º níveis (tático, e normas / procedimentos) sejam revistas, inclusive os manuais de campanha de comunicações vigentes (BRASIL, 1997a; 1997b).

Este artigo tem por objetivo discutir potenciais conhecimentos de interesse para a doutrina de emprego das Comunicações por rádio HF em Operações na Selva na atual Era da Informação. Para tal, apresenta inicialmente uma análise da doutrina vigente e dos procedimentos de emprego das radiocomunicações de HF adotados na prática atualmente nas organizações militares mais diretamente envolvidas com operações na selva. Na sequência, procurou-se identificar alguns conceitos técnicos complementares aos presentes na doutrina vigente correlata, levando em consideração o estado da técnica dos rádios atuais, bem como o estado da arte sobre propagação de ondas e antenas, em especial para o ambiente mais crítico de floresta fechada. O escopo do estudo limitou-se aos conjuntos-rádio portáteis para operações na selva por pequenos escalões, ou seja, aos equipamentos dos grupos 4 e 9, e eventualmente os dos grupos 1 e 2 utilizados naquele ambiente. A faixa de frequência geral em questão é a de HF (3 – 30 MHz), podendo se estender até 1,6 MHz (MF) para baixo, e até 50 MHz para cima (VHF baixo).

2 DOUTRINA VIGENTE DE EMPREGO DE RADIOCOMUNICAÇÃO HF EM OPERAÇÕES NA SELVA

A doutrina vigente referente ao emprego de radiocomunicações HF em operações na selva está expressa em três manuais do EB: C 11-1 Emprego das Comunicações (BRASIL, 1997a); C 24-18 Emprego do Rádio em Campanha (BRASIL, 1997b); e IP 72-1 Operações na Selva (BRASIL, 1997c). Observa-se que todos esses manuais têm mais de 18 anos de idade, sem passar por qualquer reformulação.

2.1 C 11-1 Emprego das Comunicações

No manual C 11-1, o assunto em questão é tratado em seu capítulo 7 – As Comunicações nas Operações com Características Especiais, Artigo IX – Comunicações nas Operações sob Condições Especiais de Ambiente, na seção 7-18 – Comunicações nas Operações de Selva. Dentre as principais generalidades, destacam-se: os efeitos da umidade e calor excessivos nos equipamentos de comunicações e seus circuitos eletrônicos; a limitação ou impedimento do uso de viaturas pela falta de estradas; a forte atenuação sofrida pelo sinal de rádio devida à vegetação densa; e a necessidade de se utilizar conjuntos-rádio de maior potência e antenas especiais para vencer as grandes distâncias típicas entre diferentes elementos de manobra.

Especificamente sobre rádios, o C 11-1 menciona que expedientes de toda ordem e qualquer tipo de equipamento disponível, mesmo não pertencendo à unidade, devem ser empregados para contornar as condições desfavoráveis do ambiente. Mais ainda, os rádio operadores devem ser capacitados e treinados para receber sinais fracos, escolher locais apropriados para instalação dos postos rádio e construir antenas com meios de fortuna (BRASIL, 1997a).

2.2 C 24-18 Emprego do Rádio em Campanha

O manual C 24-18 (BRASIL, 1997b) oferece orientações mais detalhadas para o emprego propriamente dito, como esperado. Seus capítulos 4 e 5 tratam de propagação de ondas e antenas em geral, respectivamente. Na seção 4.6, o manual trata da propagação em ambientes naturais, sendo as áreas de floresta abordadas em seu item d, reproduzido parcialmente a seguir, com grifos nossos:

(1) Em áreas de floresta o **principal fator de perturbação** no estabelecimento dos enlaces táticos em VHF e acima é a **atenuação pela vegetação**. Particularmente na região amazônica, o ruído em HF pode atingir valores que degradam o sinal recebido. Para enlaces no interior da região de selva

ou ribeirinha, a **faixa de frequência adequada estende-se de 8 MHz até cerca de 15 MHz**. O **mecanismo de propagação** é denominado de **“onda lateral”**. Neste modelo, a onda atinge a copa das árvores e acompanha a vegetação mais alta, como um “guia”, possibilitando **alcances da ordem de 10 (dez) quilômetros para potências na faixa de dezenas de watts**. A antena deve ser do tipo vertical.

(2) Uma alternativa para o emprego de frequências mais elevadas é se **instalar a antena acima da copa das árvores**. Este tipo de enlace requer que o outro ponto também empregue a mesma forma de instalação, ou então para a ligação terra-helicóptero ou terra-avião.

(3) **Para cobertura de maiores distâncias, o mecanismo de propagação é o da onda ionosférica**. Pode não ser desejável esse alcance, quando se tratar de operações de pequenos escalões e em áreas bem definidas.

(4) No tocante ao equipamento, os seguintes cuidados devem ser tomados:

[...]

(f) **para enlaces à distância procure uma clareira para o estabelecimento do enlace. Mesmo em HF a atenuação da floresta pode impedir o estabelecimento do enlace** (BRASIL, 1997b, p. 4-19 - 4-20. Grifos nossos).

2.3 IP 72-1 Operações na Selva

Outra importante fonte doutrinária vigente são as IP 72-1 (BRASIL, 1997c). Seu capítulo I define o que se entende por SELVA: áreas de florestas equatoriais ou tropicais densas e de clima úmido ou superúmido. Da mesma forma, define o conceito de OPERAÇÕES NA SELVA: operações ribeirinhas, aeromóveis, aeroterrestres, contra forças irregulares ou um conjunto dessas, realizadas no cumprimento de missão tática em área de selva.

O capítulo 2 das IP 72-1 define o ambiente operacional específico da selva amazônica, que é o cenário de aplicação do manual. São apresentados aspectos fisiográficos, psicossociais, políticos, econômicos e militares da selva. No contexto do presente trabalho, os aspectos fisiográficos, de relevo, e vegetação são os mais aderentes.

O relevo da selva amazônica apresenta uma peculiaridade não muito conhecida pelo público em geral. A densa cobertura da floresta praticamente impossibilita a geração de documentos topográficos que representem com acurácia e precisão o relevo abaixo da copa das árvores. Entretanto, é fato conhecido por quem opera na região que esse terreno é bastante ondulado, formando pequenos vales com desníveis de até 40m, conhecidos como “socavões” (BRASIL, 1997c).

Quanto à vegetação, os principais aspectos apresentados pelo manual são reproduzidos a seguir:

(1) A floresta Equatorial constitui-se na característica dominante da área, apesar de não apresentar um aspecto uniforme.

(2) De forma genérica, pode-se dividir a floresta Equatorial em dois tipos principais: a floresta de Terra Firme e a floresta de Terras Inundáveis.

(3) A floresta de Terra Firme ocupa áreas que se acham fora do alcance das águas das cheias e constitui a floresta Amazônica típica, com árvores de grande porte onde as copas se entrelaçam impedindo a penetração de raios solares. Abaixo dessa cobertura vegetal, o ambiente é úmido e sombrio.

[...]

(4) As árvores, embora nasçam em cotas diferentes no solo, crescem até nivelarem suas copas com as demais, na busca da luz solar.

[...]

(5) A floresta de Terras Inundáveis desenvolve-se nas margens dos principais rios da Planície Amazônica, sendo chamada de mata de várzea e de igapó. Na mata de várzea, o terreno é relativamente limpo e a vegetação apresenta também árvores de grande porte, diferentemente da mata de igapó, que é constituída de uma vegetação mais densa e de menor porte (BRASIL, 1997c, p. 2-2 - 2.3).

Por fim, em seu capítulo 8, sobre apoio ao combate, a seção 8-3 trata do apoio de comunicações. Dois aspectos se destacam aqui. Primeiro, a dimensão maior que a usual da demanda de comunicações devida à descentralização das ações e ao grande afastamento dos elementos de manobra. Por fim, a explicitação da relevância das comunicações rádio em HF, por sua maior eficiência na área de selva, inclusive para os menores escalões (grupos de combate, pelotões e companhias de fuzileiros).

3 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NA PRÁTICA NAS OM DE SELVA

A crescente demanda de importância estratégica da Amazônia trouxe importantes aportes de recursos para a F Ter poder melhor cumprir sua missão naquela região, ao longo dos últimos 20 anos. É de se esperar, portanto, que alguns avanços científico-tecnológicos desse período tenham sido incorporados para aumentar a eficiência das operações na selva, em parte dos procedimentos adotados na prática pelos operadores.

Para analisar esses procedimentos, um questionário foi elaborado para se tentar avaliar o grau de atualização da doutrina vigente, bem como identificar os principais procedimentos adotados na prática por quem tem a devida experiência. Esse formulário foi direcionado a um grupo de cerca de 280 oficiais-alunos da ECEME. A esse grupo, solicitou-se que apenas aqueles com a experiência de operação de rádio HF ou VHF em ambiente de floresta preenchessem o questionário. Não foi solicitada identificação dos participantes, apenas as OM de selva em que serviram e por quanto tempo.

Um grupo de 15 oficiais enquadrados nos critérios da pesquisa respondeu o questionário, ou seja, pouco mais de 5% do universo considerado. As experiências relatadas variavam de 2 a 6 anos de modo geral. A Tabela I expressa o resultado do primeiro aspecto

levantado pelo questionário: qual o grau de atualização e abrangência da doutrina vigente no contexto em questão. Verificou-se, nesse levantamento, que a doutrina vigente de emprego de radiocomunicações HF em operações na selva encontra-se desatualizada e incompleta.

Tabela 1. Respostas à pergunta do questionário sobre grau de atualização da doutrina vigente.

Opção	Qte	%
a) Totalmente desatualizada – tudo que está escrito não é mais válido.	1	6,67
b) Desatualizada e incompleta – apenas pequena parte do que está escrito ainda é válida e parte significativa dos procedimentos adotados na prática não está descrita na doutrina vigente.	11	73,33
c) Atualizada mas incompleta – a maior parte do que está escrito ainda é válida, mas parte significativa dos procedimentos adotados na prática não está descrita na doutrina vigente.	2	13,33
d) Atualizada – a maior parte do que está escrito ainda é válida, e apenas pequena parte dos procedimentos adotados na prática ainda não está descrita na doutrina vigente.	0	0,00
e) Totalmente atualizada – nada a acrescentar ou modificar nos manuais vigentes.	0	0,00
f) Não tenho opinião a respeito / prefiro não opinar.	1	6,67

Fonte: Elaboração própria.

Na pergunta seguinte, pedia-se a identificação dos procedimentos atuais adotados na prática mais expressivos que deveriam constar de uma atualização dos manuais vigentes, no escopo deste trabalho. Verificou-se que as novas funcionalidades presentes nos rádios digitais fazem parte das demandas e da rotina das OM de selva que empregam rádios HF ou VHF portáteis em florestas. Há também uma percepção de que o adestramento voltado para o máximo aproveitamento dessas funcionalidades deve chegar até a “ponta da linha”, pois a comunicação dos pequenos escalões com os níveis de decisão ocorre com maior frequência no contexto operativo atual. De fato, o processo de transformação da DMT prevê a digitalização do espaço de batalha como uma das implicações de maior impacto às operações (BRASIL, 2014c). No atual cenário da DMT, todos os escalões de combate precisam, em maior ou menor grau, fazer uso de dispositivos com a capacidade de transmissão de dados, incluindo imagens, localizações geográficas e mesmo vídeos. Uma lista completa dos procedimentos sugeridos pode ser encontrada em Dias (2014).

Além do aspecto tecnológico, as respostas recebidas aos formulários apontaram também a importância das especificidades conceituais de antenas e radiopropagação no ambiente de selva constarem da

doutrina, a exemplo do que se verifica no manual C 24-18 (BRASIL, 1997b). É importante, pois, que a atualização dos manuais pertinentes incorpore também os avanços científicos nesses campos ao longo das duas últimas décadas, alguns dos quais estreitamente ligados ao aspecto da digitalização dos rádios.

4 FUNDAMENTOS COMPLEMENTARES DE ANTENAS E RADIOPROPAGAÇÃO PARA EMPREGO DE RÁDIOS HF PORTÁTEIS EM FLORESTAS

Identificar e modelar os mecanismos de interação de ondas de rádio com a vegetação de uma floresta é tarefa bastante complexa. Esse problema pode ser dividido em duas partes. A primeira envolve a propagação de ondas no ambiente. O outro aspecto se refere ao acoplamento da antena do rádio transceptor com os objetos próximos ao redor (árvores principalmente) e como isso afeta o desempenho da comunicação.

4.1 Propagação de Ondas de Rádio

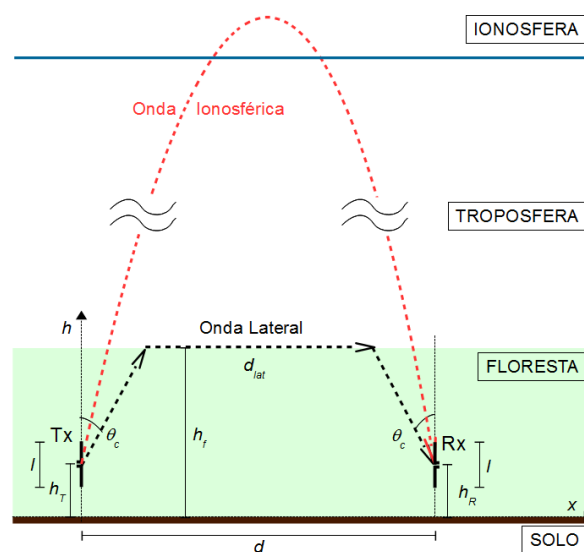
Conforme discutido nos manuais vigentes (BRASIL, 1997a; 1997b; 1997c), o ambiente operacional de selva traz sérias restrições ao apoio de comunicações às operações militares. De fato, as demandas adicionais por comunicações mais eficientes para compensar as grandes distâncias envolvidas e a falta de estradas vão de encontro à queda de desempenho imposta pelo ambiente à radiocomunicação. Ainda assim, o rádio é o melhor meio disponível para as comunicações nessas operações, seja por enlace via satélite, por refração ionosférica, ou pelo uso das ondas laterais.

A disponibilidade ampla e irrestrita de comunicações via satélite ainda é um desafio político e estratégico para o Brasil e, conseqüentemente, para suas Forças Armadas. O Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC) poderá reduzir essa antiga vulnerabilidade em alguns anos (BRASIL, 2013c). Ainda assim, enquanto essa realidade não for modificada, o rádio HF permanece como meio mais seguro de comunicações e indispensável às operações na selva.

A comunicação por ondas ionosféricas é fundamental nas operações na selva. Entretanto, para a comunicação entre pequenos escalões, em que as distâncias envolvidas são mais reduzidas (da ordem de até alguns quilômetros ou poucas dezenas de quilômetros), nem sempre a refração ionosférica é o mecanismo de propagação mais favorável ao estabelecimento das comunicações. Tamir (1967) discutiu essa questão de forma teórica, mostrando que, nesse cenário, em boa parte dos casos práticos de emprego do rádio HF/VHF, a onda lateral é o mecanismo dominante para distâncias até 10km e, mesmo além dessa distância de referência, sua magnitude é comparável à da onda ionosférica. Vale

destacar que, nessa faixa de distâncias, o modo ionosférico é quase vertical, com máximas frequências de utilização baixas, limitadas a poucos MHz durante o dia. Esse modo é conhecido pela sigla NVIS (Near Vertical Incidence Scattering), que dá nome inclusive a certas antenas para rádios táticos (HARRIS CORPORATION, 2005). A Figura 1 ilustra a importância dos dois mecanismos de propagação no cenário em questão.

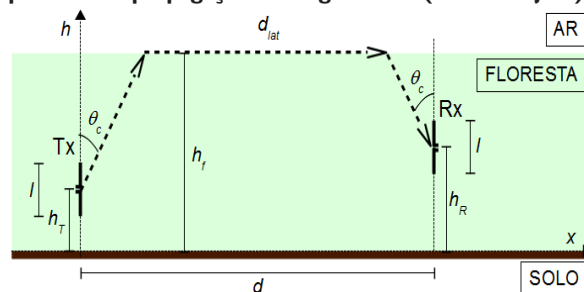
Figura 1. Mecanismos de propagação preponderantes para enlaces em HF em florestas: onda lateral e onda ionosférica



Fonte: Assis (2012, p. 38).

Tamir (1967; 1977) modelou a propagação de ondas HF e VHF em florestas de forma teórica, validando suas propostas com medidas de campo, tornando seu modelo uma referência recorrente no assunto. Ele considera a floresta como uma camada homogênea com perdas, interposta entre o solo e o ar, com a antena transmissora dentro da floresta e a propagação avaliada com base em teoria de raios (BALANIS, 1989). Da análise dos mecanismos de propagação, Tamir destacou a relevância da onda lateral. Essa componente é resultante da refração da onda transmitida do interior da floresta na interface floresta-ar, sob ângulos de incidência maiores ou iguais ao ângulo crítico correspondente (θ_c), como ilustrado esquematicamente na Figura 2.

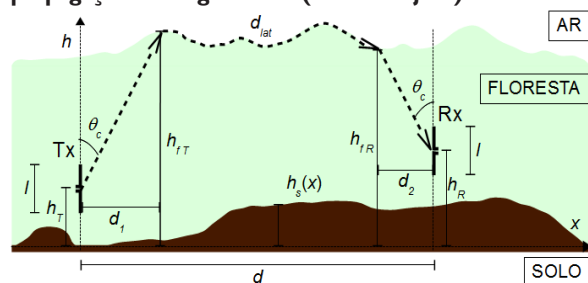
Figura 2. Conceito de onda lateral, com indicação do percurso de propagação mais significativo (linha tracejada)



Fonte: Adaptada de Melo e colaboradores (2011, p. 148).

No Brasil, alguns trabalhos de campo para estudar a radiocomunicação na selva amazônica foram realizados, em especial na década de 1980, tais como Dal Bello (1984), Pinto Filho (1986) e Cavalcante e colaboradores (1982). Os resultados principais de um projeto de pesquisa institucional do EB, M11.14, foram publicados por Dal Bello e Assis (1992a; 1992b). Nesses trabalhos, o modelo de Tamir serviu de base de comparação com os resultados medidos obtidos, apresentando boa aderência, ou seja, corroborando sua validade para o tipo de cenário em questão. Mais recentemente, esse modelo foi revisitado em Dias e colaboradores (2010; 2011a; 2011b) e Melo e colaboradores (2011), inserindo o aspecto da variação da altura do relevo na análise, como ilustrado na Figura 3. Ainda, uma revisão geral sobre a propagação de ondas em florestas nas faixas de HF e VHF foi recém publicada por Assis (2012).

Figura 3. Conceito de onda lateral adaptado heurísticamente para terrenos reais, com indicação do percurso de propagação mais significativo (linha tracejada)



Fonte: Adaptada de Melo e colaboradores (2011, p. 148).

No contexto atual de comunicações digitais sem fio, não basta analisar a propagação de ondas quanto ao aspecto do alcance. A qualidade do sinal recebido e, conseqüentemente da informação transmitida, seja ela de fonia ou dados, também é influenciada. Para tratar desse aspecto de forma mais abrangente, deve-se considerar o canal de propagação em suas duas escalas de observação. Enquanto a análise de grande escala provê informações mais conhecidas usualmente dos operadores de rádio, em especial o alcance, a de pequena escala tem como resultados parâmetros estatísticos menos conhecidos tais como: perfil de potência de retardos; espalhamento de retardos rms; banda de coerência; dentre outros (SKLAR, 1997; 2001; RAPPAPORT, 2002). O conhecimento desses momentos estatísticos de pequena escala fornece subsídios significativos para escolha de técnicas de mitigação apropriadas a sistemas de comunicação sem fio digitais, tais como codificação corretora de erros, diversidade espacial, equalização adaptativa, espalhamento espectral, uso de antenas adaptativas, etc. (SKLAR, 2001), presentes em boa parte dos rádios atuais mais completos.

Há alguns trabalhos na literatura que discutem as variações do canal em florestas, a maior parte deles com base em dados experimentais, ainda que em faixas de frequência mais altas (VHF a SHF). Alguns avaliam aspectos

de variação temporal da resposta do canal (DAL BELLO; SIQUEIRA; BERTONI, 2000; MATOS, 2005; MATOS; SIQUEIRA, 2009); outros discutem também os efeitos dos multipercursos, em particular quando potencialmente causadores de desvanecimento seletivo em frequência (SAVAGE et al., 2003; MENG; LEE; NG, 2007). De qualquer forma, ainda são poucas as referências sobre a variação da resposta do canal de propagação em florestas, especialmente as do nosso ambiente operacional, em que a onda lateral seja o modo de propagação dominante ou ao menos concorrente do NVIS.

4.2 Antenas

Em Teoria de Antenas, os parâmetros básicos refletem o desempenho da antena em suas duas funções: como elemento de circuito; e como elemento irradiante. Taxa de onda estacionária e eficiência da antena são dois parâmetros representativos do comportamento como elemento de circuito. O aspecto de irradiação é representado pelo diagrama de radiação e pelo ganho, entre outros. Em ambos os casos, as antenas são usualmente caracterizadas assumindo-se que estejam isoladas no espaço livre, ou seja, sem a influência de objetos ao seu redor. O espaço no entorno da antena em que a presença de objetos afeta de forma mais significativa seu comportamento é chamado de *região de campo próximo* (BALANIS, 2005).

A literatura disponível sobre os efeitos de objetos na região de campo próximo da antena é bastante extensa para sistemas que operam em frequências mais altas, como UHF e SHF. Há muitas referências sobre o efeito do solo, paredes e estruturas metálicas. Mais recentemente observa-se um incremento nos estudos dos efeitos do acoplamento do corpo humano com a antena de terminais portáteis, como telefones celulares e smartphones, por exemplo (VOLAKIS; CHEN; FUJIMOTO, 2010). Entretanto, quase nada se encontra sobre o efeito do acoplamento da vegetação com antenas.

Nos sistemas que operam na faixa de HF e VHF (comprimentos de onda de 100m a 1m, respectivamente), as árvores ao redor do operador em uma floresta densa tendem a estar na região de campo próximo da antena. O acoplamento entre a antena e obstáculos próximos pode levar a uma modificação não desprezível do desempenho originalmente previsto para a antena, comprometendo o próprio desempenho do rádio, em conseqüência.

Os rádios HF/VHF utilizados nas operações em floresta têm características que privilegiam a portabilidade em detrimento do desempenho. O fornecimento de energia é um aspecto crítico (uso de baterias), assim como o peso total do equipamento e a maleabilidade da antena, que devem permitir os movimentos do operador sem grandes transtornos. Todas essas condicionantes levam ao uso de antenas eletricamente curtas (de baixa eficiência) em boa parte dos casos, limitando ainda mais o alcance máximo do rádio. Cumpre destacar que uma mesma

antena pode ser eletricamente curta para uma faixa de frequências mais baixa, porém ressonante para uma faixa mais alta. Por exemplo, uma antena dipolo de 15m de comprimento é ressonante em 10 MHz (comprimento de onda $\lambda = 30\text{m}$), mas é curta para 3 MHz ($\lambda = 100\text{m}$).

Antenas eletricamente curtas apresentam várias limitações de desempenho. Quanto ao aspecto de irradiação, elas não têm capacidade de apresentar diagramas diretivos, e conseqüentemente, a diretividade é baixa. A eficiência de radiação é baixa, menor que 50%, o que reduz ainda mais o ganho da antena (ganho = diretividade \times eficiência de radiação). Do lado da adaptação de impedância, os valores baixos de resistência de radiação (da ordem de poucos ohms ou de frações de ohms) são impeditivos para que a antena apresente comportamento auto-ressonante. O uso de *adaptadores de impedância* é uma técnica que atenua essa deficiência, mas apresenta limitações advindas da própria Teoria de Circuitos (VOLAKIS; CHEN; FUJIMOTO, 2010).

Boa parte dos conjuntos-rádio já incorpora algum tipo de adaptação de impedância para melhorar o desempenho da antena ao longo de toda a banda de frequências especificada pelo fabricante. A técnica mais usual e de menor custo é o uso de *casadores de impedância passivos (filtros)*, projetados para adaptar uma antena específica à impedância de saída do rádio (tipicamente 50 Ω) na faixa desejada. Esse acoplador pode estar incorporado ao rádio ou vir junto da antena. Tal método perde em flexibilidade, portanto, quando da necessidade de uso de diferentes antenas na operação. Para cada antena, um acoplador específico é necessário.

Uma solução mais sofisticada, que exige mais espaço e não é passiva (precisa de energia elétrica para operar), são as *redes casadoras de impedância*. Esses dispositivos contêm um banco de filtros para adaptação de impedância, escolhidos de acordo com a impedância da antena conectada. A busca pela adaptação de melhor desempenho pode ser restrita a poucas opções e efetuada por chaveamento manual, ou pode ter um leque maior de opções e ser realizada automaticamente, baseada em algum algoritmo de otimização. Tipicamente, para operações na selva, embora muito desejável, esse tipo de equipamento é um fardo considerável que compromete a portabilidade, seja pelo próprio peso, seja pela necessidade de fonte de alimentação adicional. Um exemplo de especificação pode ser encontrado em Harris Corporation (2011).

A interação da antena com os elementos ao redor é um fator de degradação adicional nem sempre considerado diretamente pelos fabricantes dos equipamentos, que os especificam assumindo condição de espaço livre. Alguns trabalhos recentes buscaram avaliar, embora ainda de forma preliminar, se essa interação seria desprezível (ALEM, 2011; ALEM; SANTOS; DIAS, 2012; DIAS et al., 2012). Em condições mais favoráveis, de florestas tropicais de média densidade, tais resultados apontaram para pouca influência de um potencial

acoplamento entre a antena e a mata ao seu redor, quanto à adaptação de impedância de antenas elementares (monopolos e dipolos). Não houve oportunidade de se avaliar, entretanto, se esse comportamento se confirma em condições mais rigorosas de mata muito densa.

O estado da técnica dos rádios atuais traz consigo uma série de aspectos importantes a serem considerados em uma atualização de doutrina. Alguns desses fatores remetem mais uma vez a conceitos teóricos, em particular sobre antenas. O capítulo seguinte discute tais questões a partir das especificações dos equipamentos militares portáteis mais modernos disponíveis atualmente no mercado.

5 ESTADO DA TÉCNICA DOS CONJUNTOS-RÁDIO HF PORTÁTEIS

Quando a palavra *digitalização* é citada, a primeira funcionalidade de comunicações que vem à mente é a transmissão de dados. No contexto da evolução da radiocomunicação, entretanto, a digitalização foi além disso. Ela permeou desde a codificação da informação principal originalmente transmitida, a voz, até princípios de Teoria das Comunicações como a modulação, por exemplo. A telefonia convencional foi um dos segmentos que primeiro se beneficiou das potencialidades da digitalização da voz, através do uso de *vocoders*, que otimizavam o uso do restrito canal disponível para transmissão dessa informação, permitindo aumentar o número de usuários por canal, sem perda significativa da qualidade da voz. Os telefones celulares da 2ª geração (TDMA, CDMA, GSM) passaram a transmitir voz digitalizada aproveitando essa potencialidade, como observado durante a década de 1990, em que esse segmento sofreu um crescimento espetacular. Essa telefonia celular dos anos 1990 também incorporava novidades na arquitetura de radiotransmissão decorrentes do uso de modulação digital e de técnicas de acesso múltiplo, que também eram digitais em suas essências.

Os rádios HF e VHF militares também se valeram dos mesmos avanços decorrentes da digitalização pela qual a telefonia celular passou nos anos 1990. No rastro da significativa transformação de arquitetura, outras importantes funções avançaram como a segurança das comunicações (COMSEC) e a segurança das transmissões (TRANSEC), com conseqüências importantes para a doutrina de Guerra Eletrônica como um todo. Os rádios HF, em particular, ganharam uma nova funcionalidade há muito desejada pelos operadores: o estabelecimento automático de enlace (ALE - *Automatic Link Establishment*), uma comodidade importante dadas as conhecidas variações temporais da camada ionosférica (HARRIS CORPORATION, 2000; 2005).

Na virada do milênio, a evolução da digitalização dos rádios ganhou forma no conceito de rádio definido por *software*. Vários trabalhos foram publicados desde a década de 1990, mas somente no início deste século

as ideias principais ganharam forma de maneira mais evidente. Em essência, o conceito de RDS substitui ao máximo as funções usualmente realizadas por *hardware* dedicado ou específico, por uma arquitetura similar à de um computador cujo *software* principal executa as funcionalidades de um rádio, como ilustrado pela Figura 4. Em sua versão mais ambiciosa, além do microprocessador que carregaria o *software* com as funções de rádio, as únicas peças de *hardware* remanescentes necessárias seriam conversores A/D e D/A de alta velocidade, antena ou sistema de antenas e o chamado *front/end* de RF, onde alguma amplificação, filtragem e/ou conformação do sinal de RF se faz necessária antes da digitalização na recepção, ou na conversão em sinal de RF na transmissão (TUTTLEBEE, 2002).

A arquitetura de um RDS permite novas funcionalidades antes impensáveis para a arquitetura convencional. Por exemplo, um mesmo equipamento pode operar em diferentes faixas de frequência numa banda muito larga. O operador pode escolher a modulação ou forma de onda mais apropriada para um determinado cenário de operação, dentre várias disponíveis no equipamento, pois a mudança de uma forma de onda para outra requer uma mera operação de *software*. A transmissão de dados não mais requer modems externos, como em boa parte dos rádios convencionais, pois essa função está embutida no rol de possibilidades de um RDS. A integração em rede, com acesso inclusive à Internet, se desejável, é outra realidade disponível nesses equipamentos.

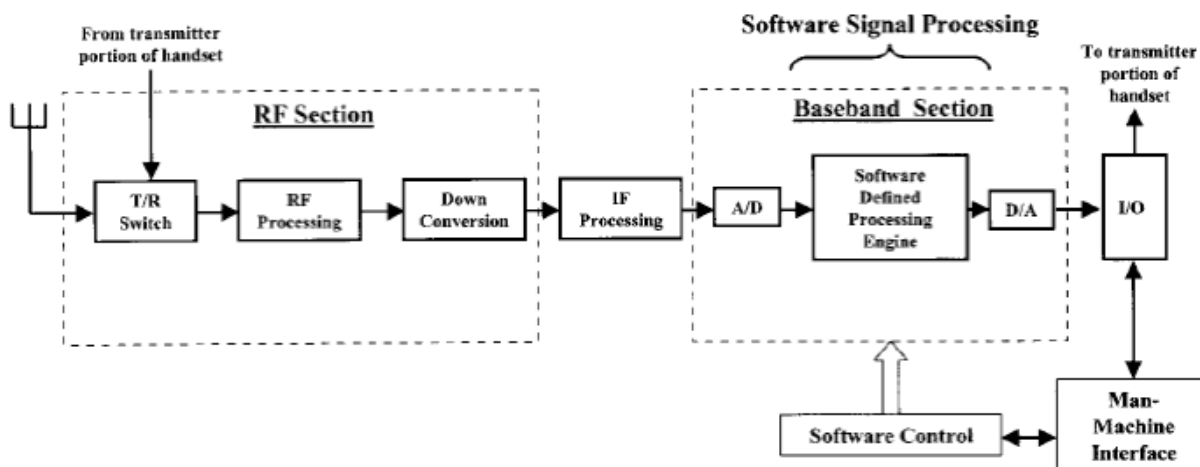
Com relação às antenas, o casamento de impedâncias também pode vir embutido no rádio, com *software* que adapte essa função às diferentes condições de operação, ou para diferentes tipos de antenas e faixas de uso. A arquitetura de um RDS demanda e facilita o uso de antenas multi-banda ou de banda ultra-larga, ou mesmo das chamadas antenas reconfiguráveis (que

se adaptam para a banda desejada). Ou seja, há uma mudança potencial importante quanto à escolha e ao uso das antenas em um RDS, que precisa ser entendida pelos operadores em prol da efetividade das operações, mesmo quando as antenas mais elementares como dipolos e monopolos forem empregadas.

Atualmente já se fala num conceito mais avançado que o de RDS que é o de *Rádio Cognitivo* (MITOLA et al., 2010). Essa evolução do RDS incorpora à capacidade do equipamento de automática e dinamicamente sondar o ambiente ao seu redor e escolher em que frequências e com que formas de onda irá operar. Esse conceito, na verdade, agrega algumas funcionalidades ao conceito de RDS, que causam algum impacto na sua arquitetura em função dessa capacidade de sondar o espectro eletromagnético em uma banda muito larga.

No contexto das radiocomunicações da F Ter, é importante destacar o papel atual do Centro de Comunicações e Guerra Eletrônica do Exército – CComGEx. Esse Centro é, hoje, o órgão responsável pela aquisição e distribuição dos conjuntos-rádio para a grande maioria das OM de todo Brasil. Como se pode perceber da consulta a informações em seu sítio *Internet* (BRASIL, 2014a), a F Ter foi, e vem sendo, dotada de equipamentos modernos como o M3TR da *Rhode & Schwartz* e os das linhas Falcon II (HF e VHF baixo) e III (VHF e UHF baixo), da *Harris corporation*, que são equipamentos classificáveis como rádios definidos por *software*. Em particular, a aquisição em massa de grande parte desses equipamentos foi realizada nos últimos anos dentro das demandas previstas pelos Projetos Estratégicos do Exército, em especial o SISFRON, o RECOP e o PROTEGER (BRASIL, 2014d). As tropas do CMA, CMN e CMO já vêm utilizando os novos equipamentos Falcon II e III com sucesso, ainda que não necessariamente se valendo de todas as suas potencialidades, mas bem além do previsto na doutrina vigente. Transmissão de dados, ligação em rede, COMSEC

Figura 4. Diagrama de blocos funcional típico de um RDS.



Fonte: Tuttlebee (2002, p. 13).

e TRANSEC, são alguns exemplos de funções reportadas como em uso corrente pelos operadores, em relatos informais.

Da presente discussão, e comparando-a com o conteúdo dos capítulos 3 e 4, verifica-se que o estado da técnica dos rádios atuais é um fator indispensável a ser considerado na atualização da doutrina de emprego de rádios HF em operações na selva. De fato, os procedimentos adotados na prática pela tropa já levam isso em conta, o que facilitará a elaboração dos novos produtos doutrinários correspondentes.

6 CONCLUSÃO

Diante do atual processo de transformação do Exército, em que a doutrina é um dos vetores que vem sofrendo mudanças e atualizações marcantes, e dada a importância da Amazônia no contexto político-estratégico de defesa da nação brasileira, o presente trabalho teve como tema central a doutrina de emprego das Comunicações por rádio HF em Operações na Selva. A hipótese de partida foi a de desatualização da doutrina em vigor, baseada em manuais cuja última edição data de 1997. Além de procurar confirmar essa hipótese, buscou-se discutir conhecimentos de interesse da doutrina potencialmente aproveitáveis no processo de confecção dos novos manuais pertinentes à função de combate Comando e Controle, previsto para os próximos anos. Ênfase particular foi dada nessa discussão a aspectos científico-tecnológicos como o estado da técnica dos rádios da atual geração, bem como o estado da arte referente às antenas e à modelagem da propagação de ondas em ambiente de floresta.

Após apresentar os principais pontos dos manuais pertinentes vigentes, uma análise sobre o grau de atualização da doutrina foi realizada com base em uma pesquisa de campo, junto a oficiais experientes nas operações em questão. O resultado confirmou a hipótese de partida, indicando que a doutrina está desatualizada e incompleta. A pesquisa também colheu informações importantes sobre os principais procedimentos adotados na prática no emprego de rádio HF em operações na selva, de potencial aproveitamento nos futuros manuais sobre o assunto.

Aspectos teóricos menos óbvios sobre propagação de ondas HF em florestas e antenas nesse ambiente foram apresentados para ampliar o leque de potenciais CID. Os mecanismos de onda lateral e onda ionosférica, já destacados na doutrina vigente, foram revisitados e complementados. De forma análoga, informações técnicas adicionais sobre antenas típicas para o cenário em questão foram discutidas, tais como o impacto no desempenho da comunicação do uso de antenas eletricamente curtas e a necessidade de investigação da influência do acoplamento eletromagnético entre a antena e os elementos da floresta ao seu redor, ainda pouco entendida.

A importância do impacto da digitalização pela qual as arquiteturas de rádio passaram ao longo de quase duas décadas motivou a discussão seguinte, acerca do estado da técnica dos rádios HF portáteis atuais. A doutrina atual da F Ter já prevê a digitalização do espaço de batalha como uma realidade, mas isso ainda não está esmiuçado em todos os manuais, pois a atualização doutrinária formal começou em 2013, com a criação do C Dout Ex. Os equipamentos mais modernos disponíveis no mercado, e já à disposição do Exército Brasileiro, tais como os das famílias Falcon II e III da *Harris Corporation*, foram desenvolvidos naquele contexto, seguindo e, ao mesmo tempo, moldando atualizações doutrinárias das FA mais modernas e operativas do mundo, as norte-americanas. E, a despeito da falta de manuais doutrinários formais atualizados, a tropa de selva vem se adaptando bem às evoluções dos rádios ao longo dos anos, como constatado pela pesquisa de campo realizada. Os procedimentos já adotados na prática certamente estarão presentes, com as devidas adaptações formais, nos novos manuais vinculados à função de combate Comando e Controle previstos para os próximos anos.

REFERÊNCIAS

- ALEM, R. A.; SANTOS, J. C. A.; DIAS, M. H. C. Medidas de impedância de uma antena monopolo HF/VHF em trecho de mata atlântica. In: MOMAG 2012: 15º Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 10º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Ago 2012, João Pessoa. **Anais...** São Paulo: SBMO e SBMag, 2012. v. 1. p. 1-5.
- ALEM, R. A. **Análise e projeto de antenas para sistemas de comunicações táticas pessoais em florestas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
- ASSIS, M. S. Radio wave propagation in the amazon jungle: a tutorial. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 2, n. 1, p. 37-44, out 2012.
- BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. New York, EUA: Wiley, 1989. 981p.
- _____. **Antenna theory: analysis and design**. 3. ed. New York, EUA: Wiley, 2005. 1136p.
- BRASIL. Exército. **Manuais e normas**. Brasília, DF, 2014a. Disponível em: <http://www.ccomgex.eb.mil.br/index.php/pt_br/manuais-e-normas>. Acesso em: 24 mar. 2014.
- _____. **C II-I: emprego das comunicações**. 2. ed. Brasília, DF, 1997a.

_____. **C 24-18**: emprego do rádio em campanha. 4. ed. Brasília, DF, 1997b.

_____. **EB10-IG-01.005**: instruções gerais para a organização e o funcionamento do sistema de doutrina militar terrestre (SIDOMT). Brasília, DF, 2012b.

_____. **EB20-IR-10.003**: instruções reguladoras para a gestão do conhecimento doutrinário. Brasília, DF, 2014b.

_____. **EB20-MF-10.102**: doutrina militar terrestre. Brasília, DF, 2014c.

_____. **IP 72-I**: operações na selva. Brasília, DF, 1997c.

_____. **Escritório de projetos do Exército**: indutores da transformação do Exército. Brasília, DF, 2014d. Disponível em: <<http://www.epex.eb.mil.br/>>. Acesso em: 08 set. 2014.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia nacional de defesa**. Brasília, DF, 2013a.

_____. **Política nacional de defesa**. Brasília, DF, 2013b.

_____. **Retrospectiva**: 2013 foi ano de conquistas e realizações para o Ministério da Defesa. Brasília, DF, 2013c. Disponível em: <<http://www.defesa.gov.br/noticias/8391-defesa-retrospectiva-2013-foi-ano-de-conquistas-e-realizacoes-para-o-ministerio-da-defesa>>. Acesso em: 08 set. 2014.

CAVALCANTE, G. P. S.; ROGERS, D. A.; GIAROLA, A. J. Analysis of electromagnetic wave propagation in multilayered media using dyadic green functions. **Radio Science**, v. 17, n. 3, p. 503-508, 1982.

DAL BELLO, J. C. R. **Propagação de ondas eletromagnéticas na floresta amazônica**. 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1984.

DAL BELLO, J. C. R.; ASSIS, M. S. Comunicações táticas na região amazônica: projeto M.II.14: propagação de ondas eletromagnéticas na região amazônica: **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. IX, n. 3, p. 12-20, 3º Quad 1992a. 1a Parte.

_____. Comunicações táticas na região amazônica: projeto M.II.14: propagação de ondas eletromagnéticas na região amazônica. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, vol. IX, no. 4, pp. 7–19, 4º Quad 1992b. 2a Parte.

DIAS, M. H. C. **Emprego das comunicações por rádio HF em operações na selva na era digital**: conhecimentos de interesse da doutrina sobre

equipamentos atuais, antenas e propagação de ondas. 2014. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Ciências Militares)–Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, Rio de Janeiro, 2014.

DIAS, M. H. C.; ALEM, R. A.; SANTOS, J. C. A. Análise crítica do modelo de Tamir para predição de alcance de rádio-enlaces em florestas. In: 9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS 2010), Dec 2010, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: UNIRIO, 2010. v. 1. p. 1-7.

DIAS, M. H. C.; MELO, M. A. K.; FARIAS, P. A.; SA, H. A.; MARQUES, A. A.; MOREIRA, L. H. A field assessment of HF/VHF wire antenna impedance changes in rain forests. In: 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Apr 2012, Praga. **Proceedings...** Praga: EuRAAP, 2012. v. 1. p. 934-938.

DIAS, M. H. C.; ROTAVA, A.; ANDRADE, F. G.; ALEM, R. A.; MELO, M. A. K.; SANTOS, J. C. A. Path loss measurements of HF/VHF land links in a Brazilian atlantic rainforest urban site. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 10, p. 1063-1067, 2011a.

_____. Análise da perda de percurso de rádio-enlaces táticos num bosque de mata atlântica. In: XIII SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA (SIGE 2011), 2011, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ITA, 2011b. v. 1. p. 1-6.

DAL BELLO, J. C. R.; SIQUEIRA, G. L.; BERTONI, H. L. Theoretical analysis and measurement results of vegetation effects on path loss for mobile cellular communication systems. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 49, n. 4, p. 1285-1293, Jul 2000.

HARRIS CORPORATION. **Especificação técnica do acoplador automático de antenas RF-5382H-CU001, para os rádios da família Falcon II**. Rochester, EUA, 2011. Disponível em: <http://rf.harris.com/media/rf-5382h-cu001_tcm26-9111.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2014.

_____. **Radio communications in the digital age**: HF technology. 2. ed. Rochester, EUA, 2005. v. 1. 94p.

_____. **Radio communications in the digital age**: VHF/UHF technology. Rochester, EUA, 2000. v. 2. 108p.

MATOS, L. J. de. **Influência da vegetação na dispersão dos sinais rádio-móveis**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MATOS, L. J. de; SIQUEIRA, G. L. Time and frequency dispersion parameters measurements at 1.88 GHz in a

- vegetated channel. **Journal of Communication and Information Systems**, v. 24, p. 24-29, 2009.
- MELO, M. A. K.; SANTOS, J. C. A.; DIAS, M. H. C. On the use of Tamir's model for site-specific path loss prediction of HF/VHF systems in forests. In: SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2011), Nov 2011, Natal. **Proceedings...** Natal: UFRN, 2011. v. 1. p. 147-151.
- MENG, Y. S.; LEE, Y. H.; NG, B. C. Wideband channel characterization in a tropical forested area. In: Microwave Conference (APMC 2007), 2007, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok: IEEE, 2007. p. 1-4.
- MITOLA, J.; ATTAR, A.; ZHANG, H.; HOLLAND, O.; HARADA, H.; AGHVAMI, H. Achievements and the road ahead: the first decade of cognitive radio. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, nr. 4, p. 1574-1577, 2010.
- PINTO FILHO, R. C. **Propagação de sinais radioelétricos na floresta amazônica**: dimensionamento de sistema. 1986. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1986.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications**: principles and practice. 2. ed. New Jersey, EUA: Prentice Hall, 2002. 736p.
- SAVAGE, N.; NDZI, D.; SEVILLE, A.; VILAR, E.; AUSTIN, J. Radio wave propagation through vegetation: factors influencing signal attenuation. **Radio Science**, v. 38, n. 5, 2003.
- SKLAR, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems: characterization. **IEEE Communications Magazine**. v. 35, n. 7. p. 90-100, Jul 1997. Part 1.
- _____. **Digital communications**. 2. ed. New Jersey, EUA: Prentice-Hall, 2001. 1079p.
- TAMIR, T. On radio wave propagation in forest environments. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. AP-15, n. 6, p. 806-817, Nov 1967.
- _____. Radio wave propagation along mixed paths in forest environments. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. AP-25, n. 4, p. 471-477, Jul 1977.
- TUTTLEBEE, W. **Software defined radio**: enabling technologies. West Sussex, ENG: John Wiley and Sons, 2002. 440p.
- VOLAKIS, J.; CHEN, C.-C.; FUJIMOTO, K. **Small antennas**: miniaturization techniques & applications. New York, EUA: McGraw-Hill, 2010. 428p.

Indicação de Responsabilidade

O conceito de autoria adotado pela CMM está baseado na contribuição substancial de cada uma das pessoas listadas como autores, seguindo as categorias abaixo:

- (1) Concepção e projeto ou análise e interpretação dos dados;
- (2) Redação do manuscrito ou;
- (3) Revisão crítica relevante do conteúdo intelectual.

Com base nestes critérios, a participação dos autores na elaboração deste manuscrito foi:

Maurício Henrique Costa Dias - 1, 2, 3.

Felipe Drumond Moraes - 1, 2, 3.

Recebido em 22 de fevereiro de 2015

Aprovado em 13 de maio de 2015