

# Estudo comparativo do desempenho de protocolos digitais em canais ionosféricos emulados

Braulio Fernando Ribeiro Sakamoto\*

Centro de Instrução de Guerra Eletrônica – Rod DF 001, km 5 s/n – Lago Norte, Brasília – DF CEP 71.559-902

**Resumo** — O presente trabalho trata de um estudo comparativo entre protocolos de comunicações digitais robustos e aqueles doutrinariamente empregados em comunicações militares de campanha, nos escalões Divisão de Exército e inferiores. Os enlaces-rádio na faixa de HF têm previsão doutrinária, sendo em determinadas situações de combate a única forma de ligação entre tropas separadas por grandes distâncias. Ainda hoje, a faixa de HF ainda é um importante recurso tático e estratégico de comunicações empregado em redes militares de comando e controle, a despeito de seu crescente desuso, em particular devido à popularização e amplo emprego dos meios de telemática e de comunicações via satélite. São avaliados quantitativamente os desempenhos de protocolos de comunicações digitais elencados com características de robustez frente a um canal ionosférico dispersivo emulado em *software*, comparando-os com aqueles doutrinariamente empregados em redes-rádio de campanha típicas.

**Palavras-Chave** — Canal Ionosférico, Comunicações Digitais, BER.

## I. INTRODUÇÃO

O problema da transmissão de ordens de um comandante tático a seus elementos de manobra tem demandando exaustivos estudos desde a aurora da ciência da guerra. Sabe-se que existe atualmente um relativo hiato, tecnológico e doutrinário, entre os equipamentos e a forma com que o Exército Brasileiro (EB) os emprega em suas comunicações e aqueles utilizados pelas forças armadas dos países mais desenvolvidos. A figura 1 esquematicamente ilustra, em linhas gerais, a divisão entre redes de comunicações táticas (*Sistema Tático de Comunicações*, SISTAC) e estratégicas (*Sistema Estratégico de Comunicações*, SEC) no âmbito do EB, bem como a relação que ocorre entre elas [1], [9], [10].

Este trabalho destina-se a verificar quantitativamente as melhorias em termos de eficiência espectral e confiabilidade quando protocolos digitais robustos são empregados em enlaces ionosféricos – sejam táticos ou estratégicos – na faixa de HF. Para discutir tais aspectos, abordando as bases teóricas mais relevantes para o presente estudo, as seções seguintes abordam os seguintes tópicos: o canal ionosférico dispersivo AWGN; as figuras de mérito elencadas; os *softwares* de simulação e metodologia de testes; e os resultados obtidos.

## II. CANAL IONOSFÉRICO DISPERSIVO AWGN

É comum que sinais em HF tenham sua potência aumentada e diminuída ao longo de períodos que variam de alguns segundos a vários minutos, dificilmente mantendo a

intensidade a níveis constantes por um longo período de tempo. O desvanecimento ou *fading* é causado, via de regra, pela interferência mútua entre vários sinais, oriundos de uma mesma fonte, que atingem o receptor percorrendo múltiplas trajetórias (ou percursos) [2].

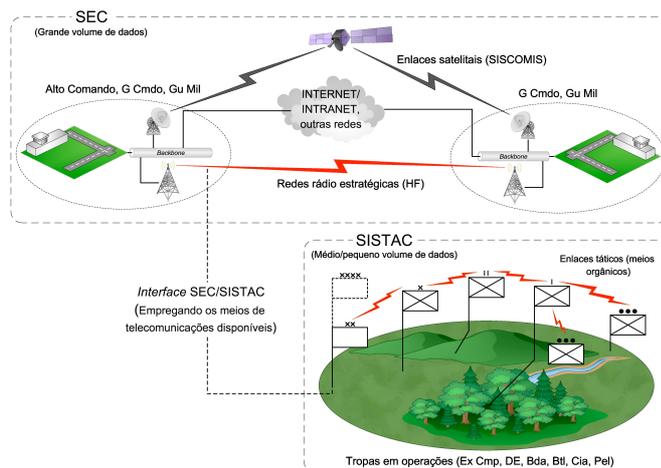


Figura 1: SEC e SISTAC.

O fenômeno de desvanecimento, dada a natureza aleatória dos fenômenos ionosféricos e da propagação eletromagnética, pode ser matematicamente modelado em termos de modelos estatísticos, sendo as distribuições de Rayleigh e Rice as mais comuns. A distribuição estatística de Rayleigh corresponde, por definição, à distribuição das magnitudes de uma variável estocástica complexa, cujas componentes real e imaginária são gaussianas. O modelo de Rayleigh é empregado convenientemente quando não há propagação em linha de visada dominante entre o transmissor e o receptor. A distribuição Rayleigh é obtida pela superposição de um grande número de componentes de campo independentes estatisticamente; a equação 1 representa sua função de densidade de probabilidade  $P(r, \sigma)$  [3]:

$$P(r, \sigma) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

onde  $\sigma^2$  é a potência média do sinal, e  $r$  é o envelope do campo elétrico do sinal radiado  $E(t)$ , sendo este dado por:

$$r(t) = \sqrt{\text{Re}^2[E(t)] + \text{Im}^2[E(t)]} \quad (2)$$

Caracterizada a natureza estatística da potência do sinal propagado em canais dispersivos de HF, resta identificar outro efeito marcante, originado do multipercurso e da natureza estocástica da camada ionosférica: o desvio e o espalhamento Doppler. A ionosfera pode ser modelada como um sistema linear (linha de retardo), cuja resposta ao impulso

é caracterizada por ganhos variantes no tempo,  $h(t, \tau_n)$ , associados a diferentes valores de retardos,  $\tau_n$ . Estes ganhos são normalmente modelados como processos estocásticos, estacionários em sentido amplo e descorrelacionados entre si (modelo WSS-US, *Wide Sense Stationary – Uncorrelated Scattering*); tais condições são válidas particularmente para pequenos valores de largura de banda ( $< 10$  kHz) e pequenos intervalos de tempo ( $< 10$  minutos) [4], [5]. A figura 2 ilustra o modelo em tela.

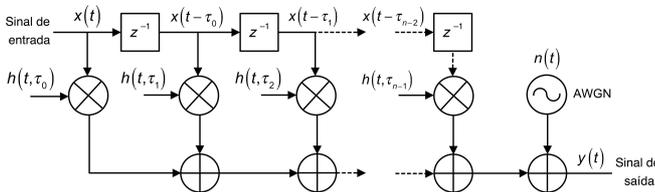


Figura 2: Modelagem do canal de HF como linha de retardo variante no tempo.

Omitidas as deduções, o sinal de saída que emerge do canal,  $y(t, \tau_n)$ , após transpor a linha de retardo de  $n$  estágios, é definido em termos do sinal de entrada,  $x(t)$ , por:

$$y(t, \tau_n) = \sum_{k=0}^{n-1} h(t, \tau_k) x(t, \tau_k) + n(t) \quad (3)$$

onde  $n(t)$  é o ruído gaussiano branco aditivo (AWGN).

O espalhamento Doppler ou taxa de desvanecimento corresponde à largura aproximada do espectro Doppler; este pode, ainda, ser visto como uma distribuição estatística de cada um dos desvios Doppler instantâneos introduzidos pelo canal. O desvio Doppler em canais na faixa de HF possui uma distribuição quase gaussiana; dada a validade dessa abordagem, tal aproximação passou a ser conhecida na literatura por *Modelo de Watterson* [6].

Testes de desempenho na faixa de HF são realizados segundo os padrões estabelecidos pelo grupo de comunicações-rádio da *International Telecommunications Union* (ITU-R, anteriormente conhecido como CCIR). A regulamentação pioneira neste tipo de teste foi implementada pela norma ITU-R F.520, que previa três modelos de canal: *ITU-R bom*, *ITU-R moderado* e *ITU-R pobre*. Tais padrões têm sido usados há anos, sendo ainda hoje conhecidos como canais CCIR. Esta norma foi substituída no ano de 2000 pela ITU-R F.1487, a qual amplia para dez o número de canais de teste, incluindo os três citados da norma F.520 [5].

Segundo a norma ITU-R F.1487, todos os canais de teste são definidos conforme a figura 2, com  $n = 1$  (dois percursos). Neste modelo, cada coeficiente  $h(t, \tau_n)$  é um processo gaussiano complexo, com espectro Doppler gaussiano; o espalhamento Doppler,  $f_d = 2\sigma_f$ , é o mesmo para os dois coeficientes; e  $\tau_m$  representa o retardo do 2º percurso.

A Tabela I apresenta os parâmetros dos canais previstos nas duas normas [4], [5].

### III. FIGURAS DE MÉRITO

As principais figuras de mérito para um protocolo digital de comunicações estão relacionadas com a ocupação espectral do sinal – que na prática se traduz na sua eficiência espectral –, e com sua confiabilidade. Esta última

normalmente é expressa em termos de taxa de erro de bit ou BER (*Bit Error Rate*), como é mais conhecida. Esta seção apresentará os dois conceitos mencionados, fundamentais para a análise dos resultados obtidos.

TABELA I  
PARÂMETROS ITU

Norma	Especificação do Canal	$\tau_m$ (ms)	$f_d = 2\sigma_f$ (Hz)
F.520	ITU-R Bom	0,5	0,1
	ITU-R Regular	1	0,5
	ITU-R Pobre	2	1
F.1487	Baixa latitude quieto	0,5	0,5
	Baixa latitude moderado	2	1,5
	Baixa latitude perturbado	6	10
	Média latitude quieto	0,5	0,1
	Média latitude moderado	1	0,5
	Média latitude perturbado	2	1
	Média latitude perturbado NVIS	7	1
	Alta latitude quieto	1	0,5
	Alta latitude moderado	7	10
Alta latitude perturbado	3	30	

#### 1) Eficiência Espectral

Por definição, a eficiência espectral de uma modulação digital consiste na razão entre o número de bits por unidade de tempo (isto é, sua taxa de transmissão de bits) e a largura de banda do sinal em banda-passante necessária para transmiti-los. Matematicamente [7], [8]:

$$\eta_B = \frac{r_b}{B_T} \quad (4)$$

onde  $\eta_B$  é a eficiência espectral, normalmente expressa em bps/Hz;  $r_b$  é a taxa de bits (bps), e  $B_T$  é a largura de banda do sinal em banda passante, em Hz.

#### 2) Taxa de erro de bit (BER)

A taxa de erro de bit, também denominada BER (*Bit Error Rate*), corresponde, por definição, à razão entre o número de bits erroneamente detectados ( $n_e$ ) no receptor e o montante total de bits transmitidos ( $n_T$ ). Matematicamente [7], [8]:

$$\text{BER} = \frac{n_e}{n_T} \quad (5)$$

A BER consiste em uma estimativa da probabilidade de um determinado bit de informação ser erroneamente detectado; define-se, dessa forma, a probabilidade de erro de bit,  $P_e$ , como o valor esperado da BER quando  $n_T \rightarrow \infty$ . Logo:

$$P_e = E[\text{BER}] \quad (6)$$

onde  $E[\cdot]$  é a média ou valor esperado da variável estocástica definida pela BER [8].

### IV. METODOLOGIA DE TESTES E SOFTWARES EMPREGADOS

#### 1) Dispositivo de testes

Os ensaios experimentais foram realizados de acordo com o esquema da figura 2. Foram empregados três terminais de computador do tipo PC (PC1, PC2 e PC3), dotados de placa de som estéreo de 16 bits, com taxa mínima de amostragem de 22 kHz (configurável), distorção harmônica total (THD) melhor que 0,001% e relação sinal-ruído (SNR) melhor que 90 dB; nesses terminais foram instalados os seguintes softwares [11], [12]:

– PC1: Tocador multimídia VLC, SkySweeper 5.01, MixW

2.19, Wavecom™ Recordings e MATLAB;

- PC2: HF PathSim; e
- PC3: CODE300-32, Wavecom W-CODE™ e SkySweeper 5.01.

A configuração mínima das máquinas empregadas consistiu em um Intel Atom® 1 GHz, 1 GB RAM, 120 GB HD, Windows® XP Home. Na figura 3, PC1 é o computador cuja placa de som gera os sinais elétricos correspondentes aos protocolos sob teste (robustos e convencionais), por meio dos softwares MixW, Wavecom™ Recordings e SkySweeper; os sinais de áudio assim gerados são enviados ao terminal PC2 por meio de cabo blindado (coaxial), a fim de evitar adição significativa de ruído induzido (naturalmente, os ruídos térmico e balísticos são impossíveis de evitar nas condições de teste).

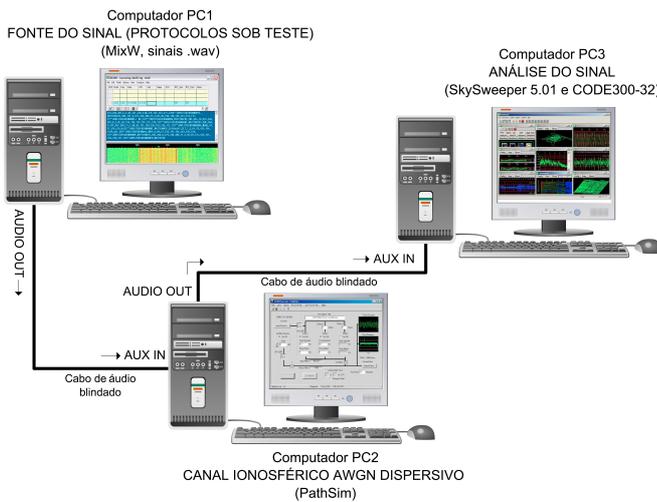


Figura 3: dispositivo do ensaio experimental.

O terminal PC2 é responsável por converter o sinal analógico de áudio para o formato digital, o qual é tratado pelo software PathSim, resultando em um sinal degradado pelo canal AWGN (sob uma SNR constante de 3 dB) com desvanecimento Rayleigh. Foi aplicado ao sinal o modelo de canal de Watterson, segundo as recomendações ITU F.1487 para baixas e médias latitudes. A próxima etapa consistiu em aplicar esse sinal degradado à entrada do terminal PC3, onde estão instalados os softwares de análise SkySweeper, W-CODE™ e CODE300-32; nestes, os protocolos sob teste tiveram avaliados seus desempenhos à luz dos indicadores elencados.

2) Metodologia

O teste de BER (ou BERT, acrônimo de BER Test) consiste em determinar, em um dado universo de bits transmitidos, qual a razão de bits incorretamente decodificados no receptor, de acordo com o descrito pelas equações (5) e (6).

Para testar a BER de um sistema de comunicações digitais deve-se estimular sua entrada por um padrão de teste. Normalmente, gera-se uma sequência binária pseudoaleatória (denominada por PRBS – Pseudo Random Binary Sequence) de dígitos 0 e 1; o comprimento dessa sequência PRBS é dado por  $2N - 1$ , onde  $N$  é um número inteiro, em geral compreendido entre 23 e 31 [13]. No ensaio em tela, a

sequência PRBS foi gerada no ambiente MATLAB™, sendo o vetor resultante possuidor de todas as características estatísticas de um sinal aleatório real, apto a simular um tráfego real de dados. Esta aproximação torna-se ainda melhor quanto maior for o comprimento  $N$  da sequência.

O cálculo da eficiência espectral é dado pela equação (4); será calculada para cada protocolo com o auxílio das ferramentas de análise de dados disponíveis nos softwares de análise (FFT e Bitrate). Determinadas estas duas grandezas, aplica-se diretamente a equação (4). Cada protocolo teve seu desempenho na modalidade broadcast (i. é, sem ARQ) testado em uma bateria de dez repetições, sendo os resultados tabulados para posterior análise estatística e comparação. A exemplo do ensaio anterior, todos os procedimentos listados acima são esquematicamente resumidos na figura 4.

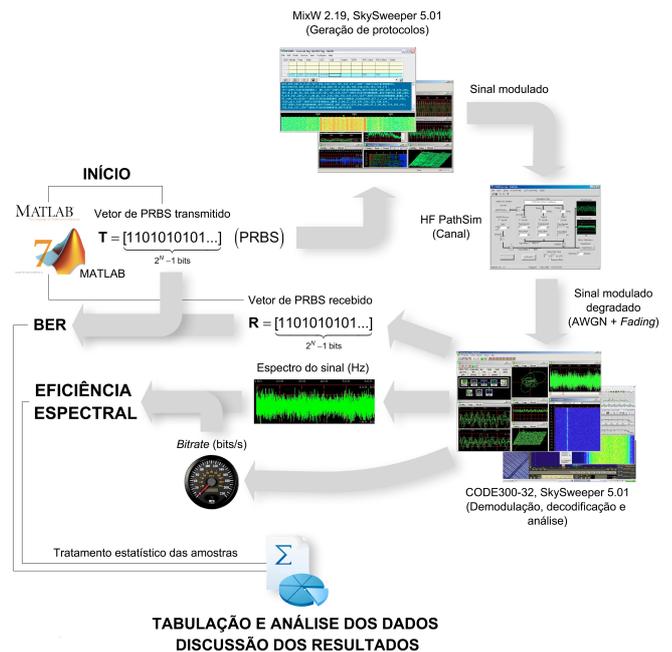


Figura 4: Diagrama esquemático dos ensaios experimentais de avaliação dos protocolos sob teste; iniciam-se com a geração do PRBS e se encerram na tabulação e discussão dos resultados.

V. RESULTADOS

A metodologia descrita foi aplicada para os protocolos MT63, PACTOR, Q15X25 e CLOVER, considerados de grande robustez frente a um cenário de forte dispersão e adição de ruído [14]. O desempenho foi então comparado, tendo por base as figuras de mérito já elencadas – eficiência espectral e BER, com os valores apresentados por protocolos convencionais, de emprego comum em redes militares de campanha (PACKET-300, RTTY e MORSE-CW) [1].

1) Taxa de erro de bit – BER

A figura 5 apresenta graficamente o comportamento da BER dos protocolos testados em condições de baixa latitude; o eixo vertical apresenta as divisões em unidades logarítmicas (potências de 10), a fim facilitar a visualização. Nota-se que em quaisquer condições, os protocolos robustos apresentam desempenho de BER superiores aos protocolos convencionais. Nas condições desse ensaio, o protocolo

PACTOR foi o que apresentou o menor valor de BER, seguido pelo Q.15X25, cujo desempenho foi praticamente idêntico na condição moderada de canal. Ressalta-se, ainda, que a BER do protocolo PACTOR em condições severas (PERTURBADO) apresentou-se melhor que na condição MODERADO, destacando a robustez desse modo digital.

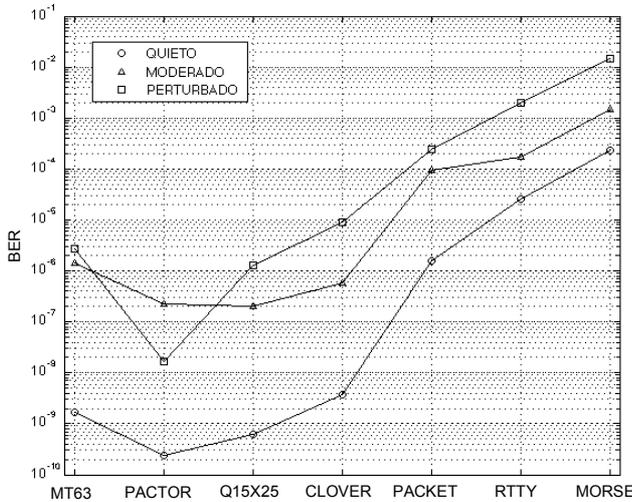


Figura 5: Desempenho de BER dos protocolos sob teste em baixas latitudes.

A figura 6, por seu turno, apresenta graficamente o comportamento da BER dos protocolos testados em condições de média latitude. Novamente, o protocolo PACTOR mostrou-se bastante eficiente, com valores muito baixos de BER (nos ensaios ele obteve valores próximos de zero na condição QUIETO). Ressalta-se novamente o protocolo Q.15X25, cujo desempenho foi praticamente idêntico ao do PACTOR na condição QUIETO de canal ( $BER \approx 0$ ). Contudo, em condições de propagação severas (PERTURBADO NVIS), destacou-se o protocolo CLOVER como o que apresentou o melhor desempenho entre os modos testados, porém muito semelhante àqueles obtidos pelo PACTOR e pelo Q.15X25.

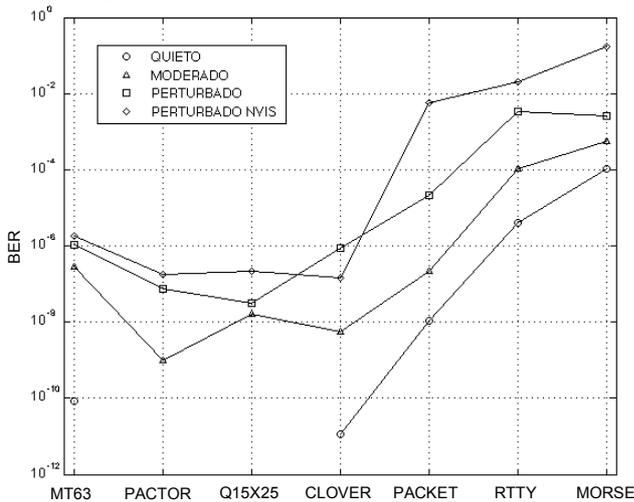


Figura 6: Desempenho de BER dos protocolos sob teste em médias latitudes.

## 2) Eficiência Espectral ( $\eta$ )

Sob o ponto de eficiência espectral, os desempenhos dos protocolos sob teste permaneceram relativamente próximos

das previsões teóricas. Conforme esperado, em condições severas de propagação, o *throughput* (taxa de transferência de bits) decai e a largura de banda é expandida em função do acréscimo de ruído adicionado pelo canal, ocasionando uma diminuição proporcional de  $\eta$ . A figura 7 ilustra o gráfico de  $\eta$  (eixo vertical) em função de cada um dos protocolos testados (eixo horizontal), considerando as condições de propagação em baixas latitudes e segundo os modelos-padrão de canal (QUIETO, MODERADO E PERTURBADO), a exemplo da análise realizada na seção anterior.

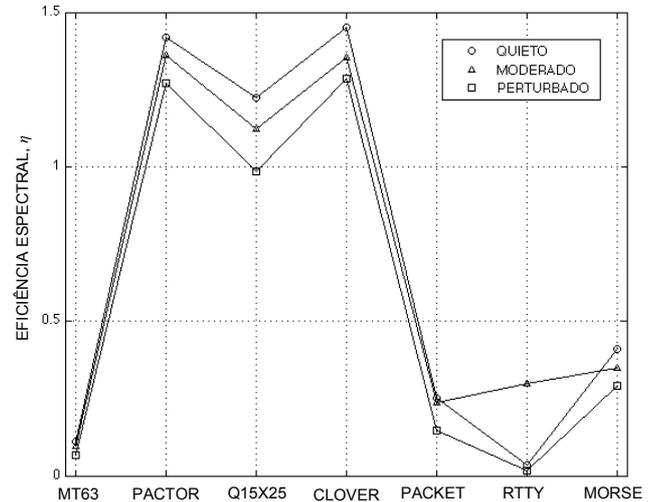


Figura 7: Desempenho de  $\eta$  dos protocolos sob teste em baixas latitudes.

Inspecionando a figura 7, conclui-se que o protocolo CLOVER apresentou a melhor eficiência espectral dos protocolos testados em todas as condições de propagação; o protocolo PACTOR, por sua vez, manteve valores de  $\eta$  bastante próximos dos apresentados pelo CLOVER, seguido pelo Q.15X25, o qual manteve bom desempenho mesmo em situações de propagação adversas. O protocolo MT63 apresentou baixa eficiência espectral em todas as baterias de testes; isso decorre da larga banda de frequências que esse modo emprega na transmissão. Entretanto, a despeito do baixo valor de  $\eta$ , a baixa taxa de erros apresentada por este modo torna-o bastante atrativo em aplicações militares.

A figura 8 ilustra o gráfico de  $\eta$  para os protocolos testados, desta vez para médias latitudes, segundo os modelos de canal mencionados anteriormente (QUIETO, MODERADO E PERTURBADO). Conclui-se não houve modificação significativa entre os protocolos testados, cujos desempenhos se mantiveram proporcionais ao observado no ensaio anterior (baixa latitude). À exceção do PACTOR, que nesta bateria de ensaios foi o que apresentou o melhor desempenho entre todos os protocolos testados (seguido pelo CLOVER, com desempenho semelhante), de forma geral houve um pequeno incremento nos valores de  $\eta$  em função da melhora nas condições de propagação.

Outros protocolos avançados, que não puderam ser analisados experimentalmente neste trabalho em função da complexidade de *hardware* requerida (PACTOR III, PACTOR IV e CLOVER-2000), apresentam desempenho superior às suas versões anteriores, de forma que pode-se extrapolar os resultados obtidos nas simulações para

patamares mais elevados, consistindo no atual estado-da-arte em comunicações digitais na faixa de HF.

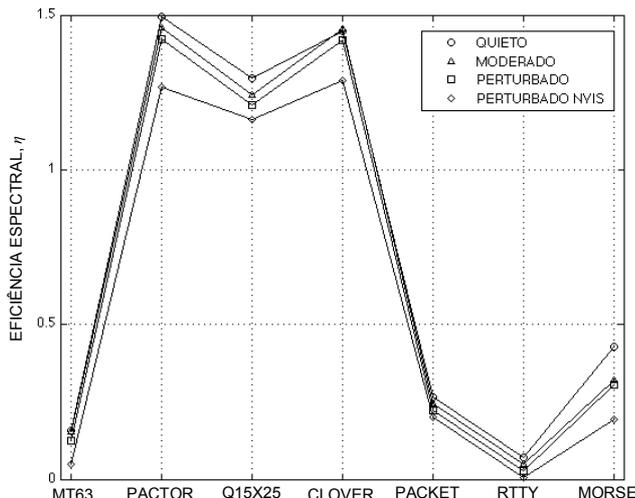


Figura 8: Desempenho de  $\eta$  dos protocolos sob teste em médias latitudes.

## VI. CONCLUSÕES

É possível postular, em decorrência dos resultados apresentados, que o emprego de protocolos de comunicações robustos em redes-rádio de campanha nos escalões DE e inferiores pode impactar positivamente o sistema de Comando e Controle dessas unidades. A grande eficiência espectral de modos como o CLOVER e o PACTOR, associada à baixa taxa de erros de transmissão permite, dentre outras capacidades:

- O reuso de frequências, pela possibilidade de endereçamento automático de postos-rádio em redes multiusuário, ao invés das topologias broadcast empregadas em sistemas convencionais;
- O uso de protocolos mais eficientes permite o compartilhamento de redes com finalidades múltiplas, inibindo a criação de redes altamente específicas, como aquelas previstas doutrinarmente;
- Protocolos confiáveis, com baixos valores de BER, implicam em diminuição do tráfego de mensagens na rede, aumentando sua segurança pelo decréscimo da probabilidade de interceptação dos sinais transmitidos;
- O aumento significativo da capacidade de transmissão de informações e ordens, em termos de volume de dados, entre os elementos integrantes do sistema de Comando e Controle.

A matriz doutrinária atual, cujo foco recai sobre as transmissões de fonia analógica, pode ser substituída, sem prejuízo, pelas transmissões digitais empregando protocolos semelhantes aos estudados neste trabalho, gerando um

aumento global na eficiência das redes-rádio de campanha sem alterações substanciais no quadro de distribuição de material das Organizações Militares;

- Sinais digitais, ao contrário das formas tradicionais de fonia analógica, RTTY e CW, permitem adição de criptografia forte (CBB, criptografia bit-a-bit) às mensagens, ocasionando uma maior segurança com relação a eventuais interceptações dos sinais por fontes não-autorizadas.

Finalmente, vale ressaltar que outra vantagem dos modos digitais apresentados neste trabalho é a possibilidade de serem utilizados em conjunto com os equipamentos-rádio existentes e outros que vierem a ser adquiridos pelo Exército Brasileiro. O único requisito que limita seu emprego é a necessidade de aquisição de *hardware* adicional para alguns modos avançados (como o PACTOR-IV e o CLOVER-2000), além de um terminal de computador ou *handheld*.

## REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. C 11-1 *Emprego das Comunicações*. 2ª Edição. Brasília, DF: Ministério do Exército, 1997.
- [2] DOLUKHANOV, M. *Propagation of Radio Waves*. Moscou: Mir Publishers, 1971.
- [3] SKLAR, BERNARD. *Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems - Part I: Characterization*. IEEE Communications Magazine, July 1997.
- [4] CCIR. Rec. ITU-R F.520 (withdrawn): *Use of high frequency ionospheric channel simulators*. 1992.
- [5] ITU-R. Rec. ITU-R F.1487: *Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators*. 2000.
- [6] WATTERSON, C. C., BENSEMA, W. D. *Experimental confirmation of an HF channel model*. IEEE Transactions on Communication Technology, COM-18(6):792-803, December 1970.
- [7] XIONG, F. (2000). *Digital Modulation Techniques*. Norwood, MA, USA: Artech House.
- [8] CARLSON, A. B.; CRILLY, P. B.; RUTLEDGE J. C. *Communication Systems. An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication*. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [9] MAUNDRELL, MEL. *Concerns for the continued Military use of HF over Potential Increases to the Background Noise Level*. DERA. [www.mikeandsniffy.co.uk/UKQRM/PLTbooks/dera.pdf](http://www.mikeandsniffy.co.uk/UKQRM/PLTbooks/dera.pdf) (acesso em 23 de fevereiro de 2010).
- [10] REYNOLDS, A. B., & BLAIR, W. D. (01 de setembro de 2001). *Tactical High Frequency Communications in the Land Arena - The Current State of the Art*. Acesso em 23 de abril de 2010, disponível em DSTO: <http://www.dsto.defence.gov.au/corporate/reports/DSTO-CR-0214.pdf>
- [11] HOKA. (11 de agosto de 2006). *HOKA Electronics - Specification CODE300-32 v3.05*. Acesso em 12 de abril de 2010, disponível em CODE300-32 Standard Version: [http://www.hoka.com/CODE300-32/CODE300-32\\_specifications.pdf](http://www.hoka.com/CODE300-32/CODE300-32_specifications.pdf)
- [12] WHEATLEY, M. (dezembro de 2000). *PathSim User and Technical Guide*. Acesso em 12 de abril de 2010, disponível em HF PATH SIMULATOR PROJECT: <http://www.moetronix.com/ae4jy/pathsim.htm>
- [13] DERICKSON, D. *Fiber Optic Test and Measurement*. Prentice-Hall, 1998.
- [14] ARRL. *The ARRL Handbook For Radio Communications - 2007 - 84th ed*. Newington, CT, USA: The American Radio Relay League, Inc, 2007.