

EFEITO DA CHUVA SOBRE O DESEMPENHO DE TERMINAIS VSAT NA TRANSMISSÃO DE DADOS POR SATÉLITE NAS BANDAS Ku e Ka

¹*Gilson A. Alencar*, ²*Mauro S. Assis* e ³*Luiz P. Calôba*

¹ UNIVERSIDADE GAMA FILHO
Dept. Eng. Elétrica - Rua Manuel Vitorino, 625 - Piedade - Rio de Janeiro
galencar@docente.ugf.br

² INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Pça. General Tibúrcio, 80 Rio de Janeiro - 22290-270

³ COPPE/EE/UFRJ, C.P. 68564, Rio de Janeiro - 21945-970

SUMÁRIO

Neste artigo será analisado o efeito da chuva sobre o desempenho de terminais VSAT (Very Small Aperture Terminal) na transmissão de dados por satélite nas bandas Ku e Ka. O desempenho do sistema será avaliado com base na relação entre disponibilidade e taxa de erro de bit (BER – Bit Error Rate) no enlace de descida obtida para diferentes valores de diâmetro de antenas comerciais utilizadas em terminais VSAT nas frequências 12 GHz (Banda Ku) e 20 GHz (Banda Ka). A taxa de erro de bit apresenta uma dependência com a relação portadora-ruído (C/N) que, por sua vez, é fortemente degradada pela chuva quando se está operando com sinais de frequência bem acima de 10 GHz. Deste modo, em aplicações sensíveis à taxa de erro de bit, como é o caso da transmissão de dados, a chuva é um fator que poderá comprometer seriamente o desempenho do sistema de comunicação. A novidade deste trabalho está no processo utilizado para estimar a atenuação por chuvas. Os valores de atenuação obtidos foram estimados a partir de uma rede neural desenhada e treinada para determinar a atenuação por chuvas em enlaces de comunicações via satélite na faixa de frequência de 11 a 30 GHz. Desta forma, este trabalho representa a primeira aplicação prática da rede neural no estudo de desempenho e confiabilidade de sistemas de comunicações via satélite.

1. INTRODUÇÃO

A implementação de redes VSAT para uso em transmissão de dados vem se expandindo em todo mundo. A tecnologia VSAT proporciona uma série de vantagens se comparada às redes de comunicações terrestres. Com a tecnologia VSAT é possível, de forma rápida e confiável, independentemente de condições de infra-estrutura local, conectar um usuário a uma rede de comunicações de dados. Muitas vezes, aplicações VSAT são vistas como vantajosas somente em regiões que não dispõem de infra-estrutura de redes terrestres (cabos metálicos, cabos de fibra óptica e enlaces de microondas). No entanto, um dado interessante mostra que cerca de 50% do total de terminais VSAT existentes no mundo estão instalados nos Estados Unidos, onde são verificadas boas condições de infra-estrutura de redes de comunicações terrestres em quase todas as regiões do país. Desta forma, pode-se afirmar que a tecnologia VSAT representa uma excelente alternativa para a saturação de redes terrestres em grandes centros urbanos e, em muitos casos, a substitui completamente quando a mesma não é capaz de atender com confiabilidade a determinadas aplicações.

Simplicidade e custo reduzido para o usuário final são as principais características da tecnologia VSAT. Uma rede VSAT é composta por estações remotas (terminais VSAT), de propriedade do usuário, e uma estação Master ou HUB

(gerenciadora da rede), controlada e mantida pelo provedor do serviço. Um terminal VSAT é caracterizado por possuir antenas com diâmetros inferiores a 2,5m e uma unidade de RF e interfaceamento de pequeno porte. Em função das características de dimensões reduzidas, o terminal VSAT se torna bastante sensível ao efeito da chuva em um esquema de transmissão de dados nas Bandas Ku e Ka. Sendo assim, este trabalho enfocará o efeito da chuva sobre a taxa de erro de bit nos terminais VSAT. Esta preocupação se deve ao fato de que existe uma tendência no mercado de prover acesso a Internet (“Internet Broadcasting”) com elevadas taxas de transmissão por meio de terminais VSAT. Além disso, a expansão do espectro em comunicações via satélite para a banda Ka já é uma realidade. No entanto, o número de satélites em operação que oferecem serviços nesta banda de frequência é muito pequeno e os efeitos da chuva sobre o desempenho de tais sistemas ainda é pouco conhecido.

Na próxima seção, será apresentado um breve comentário sobre a rede neural utilizada na estimativa da atenuação por chuvas em enlaces de comunicações via satélite. Na seção seguinte, será descrito o equacionamento empregado na análise de desempenho de terminais VSAT em uma rede de comunicações via satélite. Em seguida, será analisado o desempenho de um terminal VSAT com base em determinadas características operacionais do enlace e características técnicas dos equipamentos utilizados. Para finalizar, serão resumidas as conclusões pertinentes à análise em questão.

2. A REDE NEURAL

A rede neural implementada para realizar a previsão da atenuação por chuvas em enlaces de comunicações via satélite foi exaustivamente avaliada conforme apresentado em publicações anteriores [1], [2] e [3]. Após uma série de análises, verificou-se que a rede neural é capaz de estimar a atenuação por chuvas com razoável precisão. A rede neural em questão apresenta seis entradas, correspondentes aos parâmetros frequência, polarização, latitude, ângulo de elevação, altura da estação e taxa de precipitação excedida em uma dada percentagem de tempo relativa a um ano médio. Na saída da rede neural é obtido o valor da atenuação por chuva excedido na mesma percentagem de tempo. A rede neural utilizada neste trabalho foi treinada para estimar a

atenuação por chuvas para frequências compreendidas entre 11 e 30 GHz.

3. EQUACIONAMENTO

A taxa de erro de bit pode ser considerada como a figura de mérito dos sistemas de comunicações digitais. Matematicamente, a taxa de erro de bit representa a probabilidade de que um bit enviado possa ser recebido incorretamente. A BER pode ser determinada a partir da relação energia por símbolo e densidade espectral de ruído (E_s/N_0) que depende diretamente da relação portadora-ruído conforme, descrito na Equação 1.

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{C}{N} \frac{B}{R_s} \quad (1)$$

C/N - Relação portadora-ruído;
 B - Largura de banda do sinal digital;
 R_s - Taxa de transmissão de símbolos.

A fim de evitar a ocorrência de interferência intersimbólica, a largura de banda do sinal digital é limitada, conforme proposto por Nyquist, por um filtro passa-faixa (“Square Root Raised Cosine Filter”) em $[f_c - R_s/2]$ e $[f_c + R_s/2]$ onde, f_c é a frequência da portadora. Deste modo, a largura do sinal digital será dada por R_s . Substituindo B por R_s na Equação 1, tem-se:

$$\frac{E_s}{N_0} = \frac{C}{N} \quad (2)$$

Nas redes VSAT é muito comum o uso das modulações BPSK e QPSK. Na modulação BPSK, onde um símbolo corresponde a um bit, E_s é igual a E_b (energia por bit). Portanto, para a modulação BPSK, a Equação 2, torna-se:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{C}{N} \quad (3)$$

Para a modulação QPSK cada símbolo é constituído por dois bits e, neste caso, $E_s = 2E_b$. Substituindo este valor na Equação 2, a relação E_b/N_0 torna-se:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{2} \frac{C}{N} \quad (4)$$

Conhecido o valor da relação E_b/N_0 , a taxa de erro de bit é determinada através de curvas que representam os valores de BER em função de E_b/N_0 para diferentes taxas de codificação e decodificação utilizando o algoritmo de Viterbi [4]. Este algoritmo é uma técnica de detecção e correção de erros (FEC – “Forward Error Correction”) considerada como a melhor para comunicações digitais, onde a eficiência de energia é o fator preponderante. As redes VSAT geralmente utilizam o algoritmo de Viterbi com taxa de codificação de 1/2 no enlace HUB-VSAT e 3/4 no enlace VSAT-HUB [4].

Um código de taxa 1/2 produz dois bits de saída para cada bit de informação de entrada no receptor. Um valor de 10^{-7} para o limiar da BER é tido como aceitável para transmissão de dados em redes VSAT [4]. No caso da disponibilidade, valores típicos para redes VSAT estão compreendidos entre 99 a 99,6 % [4].

Como foi visto anteriormente, o valor de E_b/N_0 para as modulações BPSK e QPSK dependerá da relação portadora-ruído. Por sua vez, a relação portadora-ruído no terminal VSAT poderá ser determinada a partir da seguinte expressão,

$$\frac{C}{N} = EIRP - A_0 + \frac{G}{T} - 10 \log(KB_{RF}) - A_g - A_c - L_u - L_a \quad (5)$$

onde

EIRP - Potência equivalente isotropicamente irradiada pelo satélite (dBw);
 A_0 - Atenuação de espaço livre (dB);
 G/T - figura de mérito do terminal VSAT (dB/K);
 G - Ganho da antena do terminal VSAT (dB);
 T - Temperatura de ruído do sistema de recepção (K);
 k - Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
 B_{RF} - Largura de Faixa de RF do receptor (Hz);
 A_g - Absorção pelos gases atmosféricos (dB);
 A_c - Atenuação causada pela chuva (dB);
 L_u - Perda equivalente à contribuição de ruído no enlace de alimentação (dB);
 L_a - Perdas adicionais no guia de ondas, Apontamento do satélite, etc. (dB).

A atenuação de espaço livre é determinada pela expressão,

$$A_0 = 32,4 + 20 \log d(Km) + 20 \log f(MHz) \quad (6)$$

onde, d corresponde a distância em Km do terminal VSAT ao satélite e f é a frequência de

operação em MHz. A distância do terminal ao satélite pode ser determinada a partir da seguinte equação:

$$d(Km) = \sqrt{r_0^2 + a^2 - 2r_0a \cos A \cos B} \quad (7)$$

onde

$r_0 = 42164$ Km é a distância entre o satélite e o centro da terra;

$a = 6378$ Km é o raio equatorial da Terra.

A - Latitude correspondente a localidade do terminal VSAT (positiva para latitudes Norte e negativa para latitudes Sul);

B - Diferença entre as longitudes da localidade do terminal VSAT e do ponto de sub-satélite (tomada positiva se a estação terrena estiver a Oeste do satélite).

A relação G/T é determinada em função do ganho da antena do terminal VSAT e da temperatura de ruído do sistema de recepção em condições de chuva. Esta última, pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$T_{S/C} = T_R + [1 - 10^{-L_g/10}]T_0 + T_{A/C} 10^{-L_g/10} \quad (8)$$

onde,

T_0 - 290^0 K;

L_g - Perda no guia de alimentação da antena receptora (dB);

T_R - Temperatura de ruído do receptor (0 K);

$T_R = T_0 (10^{F/10} - 1)$;

F - Fator de ruído do receptor (dB);

$T_{A/C}$ - Temperatura de ruído da antena na condição de chuva (0 K);

$T_{A/C} = T_0 (1 - 10^{-A/10}) + 10^{-A/10} T_A$;

T_A - Temperatura de ruído da antena em condições de céu claro (0 K).

$A = A_g + A_c$;

A_g - Atenuação por gases (dB);

A_c - Atenuação por chuvas (dB).

O ganho da antena de recepção é determinado por:

$$G = h \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (9)$$

onde

η - Eficiência da antena do terminal VSAT;

D - Diâmetro da antena do terminal VSAT (m);

λ - Comprimento de onda (m).

4. ANÁLISE DE DESEMPENHO

O território brasileiro foi tomado como referência para análise de desempenho de terminais VSAT em uma rede de comunicações via satélite. O efeito da chuva sobre a taxa de erro de bit foi avaliado em uma condição tida como o pior caso. Esta condição corresponde à localização de um terminal VSAT em uma região do país que apresenta elevada intensidade de chuva e que proporcione um menor ângulo de elevação para a antena do terminal. O UIT-R dividiu o globo em 15 zonas climáticas classificando-as em ordem alfabética de A a Q (incluindo a letra K e excluindo as vogais I e O) [5]. O Brasil, país caracterizado por climas tipicamente tropical e equatorial, se enquadra nas zonas de chuva N e P do UIT-R. Como a zona climática P é a que apresenta maior intensidade de chuva, foi selecionada uma localidade com coordenadas geográficas correspondentes a de uma região de clima P e que resulta em um ângulo de elevação menor dentro da área de abrangência da mesma. A localidade que atende às condições estabelecidas anteriormente está aproximadamente na latitude 22^o Sul e longitude 45^o Oeste.

A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) determinou a longitude 51^o Oeste para ser ocupada por um satélite geoestacionário com o intuito de oferecer, futuramente, serviços de telecomunicações para o território brasileiro nas bandas Ku e Ka [6]. Baseado nesta longitude e nas coordenadas geográficas da localidade selecionada para instalação de terminais VSAT, o ângulo de elevação foi determinado por,

$$q = tg^{-1} \left(\frac{6,61 \cdot \cos A \cdot \cos B - 1}{6,61 \sqrt{1 - \cos^2 A \cos^2 B}} \right) \quad (10)$$

onde os ângulos A e B correspondem exatamente aos definidos na Equação 7. Calculando os ângulos A e B e substituindo na Equação 10, obtém-se um ângulo de elevação de 63,4^o.

A análise de desempenho foi realizada considerando as frequências de operação 12 GHz (Ku) e 20 GHz (Ka) para o enlace de descida. Os valores adotados para as demais grandezas utilizadas no cálculo de C/N, estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores adotados para as grandezas utilizadas no cálculo de C/N.

GRANDEZAS	VALOR ADOTADO
EIRP	50 dBw
B _{RF} (Banda Ku)	36 MHz
B _{RF} (Banda Ka)	100 MHz
L _u	0,5 dB
L _a	0,5 dB
L _g	0,2 dB
F (Fator de Ruído)	2,0 dB
T _A	40 ^o K
η	65%

Cabe ressaltar que os valores apresentados na tabela 1 foram definidos com base em dados obtidos a partir de manuais de equipamentos e de satélites que operam nas bandas Ku e Ka.

Para a estimativa da atenuação por chuva pela rede neural, a polarização foi definida como linear, horizontal mais especificamente, e a altura da estação terrena (altura do terminal VSAT em relação ao nível do mar) como zero. Os valores de atenuação estimados pela rede correspondem à atenuação excedida em 0,1%, 0,5% e 1,0% do tempo. A atenuação por gases foi determinada com base no modelo do UIT-R [7]. Os valores de taxa de precipitação utilizados na estimativa da atenuação correspondem aos da zona climática P do UIT-R. As tabelas 2 e 3 mostram os valores de atenuação por chuva estimados pela rede neural para as disponibilidades consideradas neste trabalho. Na mesma tabela, são apresentados os valores da atenuação por gases e da atenuação atmosférica total para cada uma das frequências analisadas.

Tabela 2: Atenuação por gases e chuva para 12 GHz (Banda Ku).

Disp.	A _g (dB)	A _c (dB)	A _t (dB)
99,9%	0,25	3,31	3,56
99,5%	0,25	3,06	3,31
99,0%	0,25	1,83	2,08

Tabela 3: Atenuação por gases e chuva para 20 GHz (Banda Ka).

Disp.	A _g (dB)	A _c (dB)	A _t (dB)
99,9%	0,98	6,99	7,97
99,5%	0,98	4,55	5,53
99,0%	0,98	2,61	3,59

A disponibilidade do enlace de comunicação para os terminais VSAT foi avaliada para antenas com diâmetros variando de 0,6 a 2,4 m (valores comerciais). Com base nos dados de atenuação por chuva estimados pela rede neural e, empregando o equacionamento discutido na seção anterior, foi possível obter a taxa de erro de bit para antenas de diferentes diâmetros considerando diferentes valores de disponibilidade. A BER foi determinada tanto para a modulação BPSK quanto para a modulação QPSK. As tabelas 4 e 5 apresentam os valores aproximados para a BER obtidos para terminais com antenas de diâmetros iguais a 0,67 , 0,98 e 1,2 m nas disponibilidades 99,9 %, 99,5 % e 99 %.

Tabela 4: BER para 12GHz na modulação BPSK.

	0,67 m	0,98 m	1,2 m
99,9%	10^{-4}	10^{-9}	$>10^{-13}$ $<10^{-12}$
99,5%	$>10^{-5}$ $<10^{-4}$	$>10^{-10}$ $<10^{-9}$	10^{-14}
99,0%	$>10^{-8}$ $<10^{-7}$	10^{-14}	$<10^{-15}$

Tabela 5: BER para 12GHz na modulação QPSK.

	0,67 m	0,98 m	1,2 m
99,9%	$>10^{-2}$	10^{-4}	$>10^{-7}$ $<10^{-6}$
99,5%	$>10^{-2}$	$>10^{-5}$ $<10^{-4}$	10^{-7}
99,0%	10^{-3}	10^{-7}	$>10^{-12}$ $<10^{-11}$

Analisando as tabelas 4 e 5 verifica-se que a condição de uma BER menor que 10^{-7} para transmissão de dados é alcançada para terminais VSAT com antenas de diâmetro igual ou superior a 98 cm na modulação BPSK considerando uma disponibilidade de 99,5 %. No entanto, para uma disponibilidade de 99 %, a referida condição é plenamente satisfeita para terminais VSAT com antenas de diâmetro a partir de 67 cm. Para uma modulação do tipo QPSK, o desempenho se torna um pouco mais crítico. Para este caso, o desempenho do terminal é mais favorável para antenas com diâmetro acima de 98 cm, considerando uma disponibilidade de 99 %. Sendo assim, para redes VSAT que operam na banda Ku, seria mais recomendado utilizar antenas com diâmetro a partir de 98 cm para garantir uma disponibilidade de no mínimo 99 %, tanto para a modulação BPSK quanto para a modulação QPSK. Uma disponibilidade de 99,5% é alcançada utilizando antenas de 1,2 m de

diâmetro. Como a modulação QPSK proporciona uma redução significativa da largura de banda alocada no satélite, a mesma é muito utilizada em redes VSAT com o propósito de reduzir os custos relativos ao segmento espacial. Neste caso, recomenda-se utilizar antenas com diâmetro superior a 98 cm para alcançar uma disponibilidade de no mínimo 99 %.

A mesma análise foi conduzida para a banda Ka e os resultados relativos a BER não foram satisfatórios para o desempenho dos terminais VSAT com antenas de diâmetro variando de 67 cm a 1,2 m. Na maioria dos casos, a BER apresentou valores superiores a 10^{-2} . Desempenhos melhores foram alcançados com antenas de diâmetro 1,8 e 2,4 m. As tabelas 6 e 7 apresentam os valores da taxa de erro de bit para os diâmetros citados nas modulações BPSK e QPSK.

Tabela 6: BER para 20GHz na modulação BPSK.

	1,8 m	2,4 m
99,9%	$>10^{-3}$ $<10^{-2}$	$>10^{-6}$ $<10^{-5}$
99,5%	$>10^{-6}$ $<10^{-5}$	$>10^{-12}$ $<10^{-11}$
99,0%	10^{-11}	$<10^{-16}$

Tabela 7: BER para 20GHz na modulação QPSK.

	1,8 m	2,4 m
99,9%	$>10^{-2}$	$>10^{-2}$
99,5%	$>10^{-3}$ $<10^{-2}$	$>10^{-6}$ $<10^{-5}$
99,0%	$>10^{-6}$ $<10^{-5}$	$>10^{-10}$ $<10^{-9}$

Baseado nos valores de BER das tabelas 6 e 7 verifica-se facilmente a dificuldade de se obter um desempenho satisfatório na banda Ka para a modulação QPSK. Desempenhos mais favoráveis para este tipo de modulação podem ser alcançados com antenas de 2,4 m de diâmetro. Neste caso, é possível atingir uma disponibilidade de pelo menos 90%. Para a modulação BPSK, pode-se alcançar um bom desempenho com antenas de diâmetro 1,8 e 2,4 m com uma disponibilidade máxima de 99,5 %.

Os resultados obtidos para a banda Ku estão coerentes com informações técnicas oferecidas por algumas empresas que operam com redes VSAT. No entanto, para a banda Ka, a falta de dados para efeito de comparação não permite uma avaliação mais precisa dos resultados obtidos

neste trabalho. Porém, era esperado que a taxa de erro de bit sofresse grande degradação em uma condição de chuva intensa. Esta degradação impede o uso de antenas de diâmetro muito pequeno em regiões de clima tropical e equatorial.

5. CONCLUSÕES

Com este trabalho, foi possível conhecer um pouco mais sobre os efeitos da chuva no desempenho de terminais VSAT nas bandas Ku e Ka em um esquema de transmissão de dados. A avaliação foi conduzida para uma situação pouco favorável em termos de localização e condições climáticas no território brasileiro. Os resultados obtidos permitiram identificar valores de diâmetro mais apropriados para a antena de um terminal VSAT. Os resultados mostraram que antenas com diâmetro menores que 98 cm poderão não apresentar uma bom desempenho com relação a taxa de erro de bit cujo limiar foi fixado em 10^{-7} para transmissão de dados. Verificou-se através destes resultados que, para a banda Ku, a disponibilidade do enlace poderá se situar entre 99 e 99,6% o que está de acordo com dados obtidos a partir de empresas operadoras de redes VSAT. O desempenho foi avaliado também considerando as modulações BPSK e QPSK. A modulação QPSK, muito utilizada em redes VSAT, produz taxas de erro de bit, maiores se comparada a modulação BPSK. No entanto, a modulação QPSK permite a redução da banda a ser alocada no satélite. Esta redução minimiza os custos relativos ao segmento espacial. Para a banda Ka, os resultados mostraram que o desempenho de um terminal VSAT não é favorável para antenas com diâmetro muito pequeno em condições mais adversas. Para antenas a partir de 1,8 m pode-se alcançar um desempenho melhor com disponibilidade de 99 %, tanto para a modulação BPSK quanto para a modulação QPSK. No entanto, o pequeno número de dados disponíveis, com relação ao comportamento de sistemas de comunicações por satélite na banda Ka, não permitem uma avaliação mais precisa destes resultados.

Com bases nos resultados, foi possível observar que a rede neural estimou de forma coerente os valores da atenuação por chuva. Este trabalho representa a primeira aplicação da rede neural na análise de desempenho de um sistema de comunicações via satélite.

Cabe ressaltar que a análise conduzida neste trabalho foi tomada com base em uma situação pouco favorável no território brasileiro. No entanto, para outras regiões do país, com climas do tipo N por exemplo, pode-se alcançar desempenhos melhores com antenas de pequeno diâmetro, principalmente, para a banda Ka. Um mapeamento mais preciso sobre o efeito da chuva em terminais VSAT para a banda Ka será elaborado em futuros trabalhos à medida que novas informações venham a ser agregadas.

6. REFERÊNCIAS

- [1] G. A. Alencar, L. P. Calôba e M. S. Assis, "The Behaviour of an Artificial Neural Network in the Slant-Path Rain Attenuation", XXVIth General Assembly of the International Union of Radio Science, Toronto, Canadá, Agosto, 1999.
- [2] G. A. Alencar, L. P. Calôba e M. S. Assis, "Performance Investigation of an Artificial Neural Network Used to Predict Radiowave Attenuation by Rain in Earth-Space Paths", URSI Commission F International Triennial Open Symposium on Wave Propagation and Remote Sensing, Aveiro, Portugal, Setembro, 1998.
- [3] G. A. Alencar, L. P. Calôba e M. S. Assis, "Rain Attenuation Prediction in Earth-Space Paths Performed by Artificial Neural Networks", CLIMPARA'98, Ottawa, Canadá, Abril, 1998.
- [4] INTELSAT, "VSAT Handbook", Setembro, 1998.
- [5] CCIR, "Radiometeorological Data", Report 563-4, XVIIth Plenary Assembly, Vol V, Dusseldorf, 1990.
- [6] ANATEL, "Edital de Licitação para Direito de Exploração de Satélite Brasileiro para Transporte de Sinais de Telecomunicações", Abril, 2001.