

# Limitação de Alcance em Radioenlaces que Operam Acima de 10 GHz sob Chuva

Hygson Assef Pereira da Rocha & Geraldo Gil Ramundo Gomes

**Abstract**—Several propagation effects must be considered in the design of line-of-sight radio links. Among them, there is the attenuation due to precipitation (rainfall conditions). The objective of this paper is to present the influence of rain in limiting the range of radio links that operate on frequencies above 10 GHz, according to the Recommendation ITU-R P.530-15 and ITU-R P.838-3. The results were obtained from typical design parameters, to become a useful source of consultation to students and telecommunication engineers, seeking to understand the effects of rain in the design of line-of-sight radio links.

**Index Terms**—attenuation, propagation, rain, range, design, line-of-sight, links, rainfall, distance, precipitation.

**Resumo**—Diversos efeitos de propagação devem ser considerados no projeto de radioenlaces. Dentre eles, inclui-se a atenuação devido à chuva. O objetivo deste trabalho é apresentar a influência da chuva na limitação do alcance em sistemas de radioenlaces que operam em frequências acima de 10 GHz, de acordo com as Recomendações ITU-R P.530-15 e ITU-R P.838-3. Os resultados foram obtidos a partir de parâmetros típicos de projeto, para tornar o trabalho uma fonte de consulta útil a estudantes e engenheiros de telecomunicações que procuram entender os efeitos da chuva no projeto de radioenlaces.

**Palavras-chave** — propagação, radioenlace, atenuação por chuva, projeto de radioenlace.

## I. INTRODUÇÃO

A atenuação sofrida por ondas eletromagnéticas é o resultado de dois efeitos: absorção e dispersão. Nas regiões de clima tropical e subtropical, os hidrometeoros que mais influenciam no desempenho de um radioenlace, na faixa de SHF que se estende de 3 GHz a 30 GHz, são as gotas de chuva. Ryde e Ryde [1] calcularam os efeitos da chuva na propagação de micro-ondas e mostraram que os efeitos de absorção e espalhamento nas gotas de chuva tornam-se mais acentuados na medida em que o comprimento de onda do sinal propagado aproxima-se do tamanho das gotas de chuva. Desta forma, isso ocorre para comprimentos de onda abaixo de 3 cm (acima de 10 GHz).

As gotas de chuva apresentam-se como um meio dielétrico imperfeito para o campo elétrico incidente, provocando a absorção e o espalhamento da energia que se propaga no meio [2]. A absorção acontece devido à condutividade da água, que provoca a dissipação de parte da energia da onda incidente, aquecendo, dessa maneira, a gota de chuva. Quando a gota alcança a temperatura do meio ao seu redor, a energia é isotropicamente reirradiada [3].

Por sua vez, o espalhamento é provocado pelas modificações sofridas pela onda para satisfazer às condições de contorno em cada gota de chuva. Nesse caso, não há perda de energia. A direção do espalhamento da energia pode ser qualquer uma: espalhamento reverso (mecanismo aproveitado pelos radares), espalhamento lateral (a direção da onda se desvia do percurso da transmissão) e espalhamento direto (energia redirigida no percurso da transmissão). As Figuras 1 e 2 ilustram a absorção e os possíveis espalhamentos.

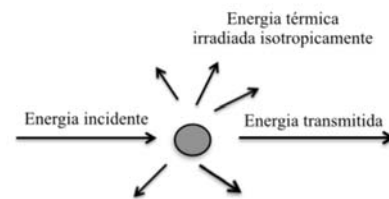


Figura 1. Atenuação por absorção.

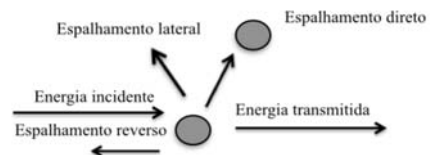


Figura 2. Atenuação por espalhamento.

Como consequência da atenuação provocada pela chuva, a relação sinal-ruído recebida diminui, aumentando a taxa de erro de bit dos sistemas de radioenlaces digitais. Por esse motivo, o efeito da chuva não deve ser ignorado no dimensionamento e análise desses radioenlaces. Uma vez constatado que o radioenlace opera sem obstruções, difrações e reflexões, outras perdas a serem consideradas são as perdas causadas pelo vapor de água (em torno dos 23 GHz), pelo oxigênio (em torno dos 60 GHz) e pela precipitação, além da atenuação de espaço livre.

O principal componente do somatório das atenuações fixas em um radioenlace é a atenuação de espaço livre, que depende da extensão do enlace e da frequência. Este trabalho mostra, para vários cenários, os alcances em função da atenuação adicional produzidas pela chuva, servindo também como guia passo-a-passo para cálculo da atenuação por chuva de acordo com as Recomendações ITU-R P.530-15 [4] e ITU-R P.838-3 [5].

II. ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA SEGUNDO A ITU

A. Atenuação Específica ( $\gamma_R$ )

A atenuação específica  $\gamma_R$  devido à chuva, em dB/km, sofrida por uma onda eletromagnética, depende fundamentalmente da taxa de chuva  $R_p$  (em mm/h), que é excedida em uma porcentagem  $p$  dentro de um período de tempo de referência, geralmente um ano. A Tabela I mostra a relação entre as taxas de chuva e suas classificações subjetivas [6].

TABELA I  
TAXAS DE CHUVA E SUAS INTENSIDADES SUBJETIVAS.

Tipo de chuva	Precipitação típica
Chuvisco	0,25 mm/h - 1,25 mm/h
Chuva leve	1,25 mm/h - 12,5 mm/h
Chuva média	12,5 mm/h - 25 mm/h
Chuva forte	25 mm/h - 100 mm/h
Tempestade tropical	> 100 mm/h

A Recomendação ITU-R P.837-6 [7] apresenta em sua Figura 2 um mapa da América do Sul nos quais estão traçadas curvas de taxas de precipitação pluviométricas que são excedidas em 0,01% da média de um ano. Os dados referentes ao Brasil, apresentados em termos de seus valores mínimos e máximos por região, são apresentados na Tabela II [6].

TABELA II  
FAIXAS PARA AS TAXAS DE CHUVA QUE SÃO EXCEDIDAS EM 0,01% DA MÉDIA DE UM ANO POR REGIÃO DO BRASIL.

Região do Brasil	Faixa para $R_{0,01}$
Norte	80 – 110 mm/h
Nordeste	40 – 70 mm/h
Centro-Oeste	60 – 80 mm/h
Sudeste	60 – 80 mm/h
Sul	50 – 70 mm/h

De acordo com a Recomendação ITU-R P.838-3, a atenuação específica provocada pela chuva denotada por  $\gamma_R$ , em dB/km, é calculada pela seguinte relação:

$$\gamma_R = k \cdot R_{0,01}^\alpha \quad (1)$$

Em (1)  $k$  e  $\alpha$  são constantes que dependem da polarização da onda e da frequência de operação, sendo determinados pelas seguintes equações:

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j e^{-\left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j}\right)^2} + m_k \log_{10} f + c_k \quad (2)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j e^{-\left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j}\right)^2} + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (3)$$

onde  $f$  é a frequência expressa em GHz.

Para a polarização horizontal, as constantes  $k$  e  $\alpha$  são denotadas como  $k_H$  e  $\alpha_H$ , respectivamente. Da mesma forma, para a polarização vertical, são denotadas como  $k_V$  e  $\alpha_V$ . As constantes  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ,  $m_k$ ,  $c_k$ ,  $m_\alpha$  e  $c_\alpha$  são coeficientes cujos

valores são encontrados nas Tabelas III, IV, V e VI.

TABELA III  
VALORES DOS COEFICIENTES  $K_H$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400		
3	-0,23789	0,86036	0,15354		
4	-0,94158	0,64552	0,16817		

TABELA IV  
VALORES DOS COEFICIENTES  $K_V$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_k$	$c_k$
1	-3,80595	0,56934	0,81061	-0,16398	0,63297
2	-3,44965	-0,22911	0,51059		
3	-0,39902	0,73042	0,11899		
4	0,50167	1,07319	0,27195		

TABELA V  
VALORES DOS COEFICIENTES  $\alpha_H$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822		
3	0,32177	0,63773	0,13164		
4	-5,37610	-0,96230	1,47828		
5	16,1721	-3,29980	3,43990		

TABELA VI  
VALORES DOS COEFICIENTES  $\alpha_V$ .

$j$	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$m_\alpha$	$c_\alpha$
1	-0,07771	2,33840	-0,76284	-0,053739	0,83433
2	0,56727	0,95545	0,54039		
3	-0,20238	1,14520	0,26809		
4	-48,2991	0,791669	0,116226		
5	48,5833	0,791459	0,116479		

B. Comprimento Efetivo do Enlace ( $d_{eff}$ )

Uma vez determinada a atenuação específica, deve-se determinar o comprimento efetivo do enlace  $d_{eff}$ , que é o segmento do enlace em que ocorre a precipitação com a taxa de chuva  $R_p$  especificada. Isso se deve ao fato de que a chuva cai em forma de células, ou seja, estatisticamente, a chuva atinge apenas uma porção da trajetória do radioenlace. É para essa porção que a atenuação deve ser calculada. Sendo  $d$  o comprimento real do radioenlace (em km) e  $r$  o fator de distância, a distância é determinada pela seguinte expressão:

$$d_{eff} = dr \quad (4)$$

Conforme a Recomendação ITU-R P.530-15, uma estimativa do fator de distância é dada pela seguinte equação:

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633} R_{0,01}^{0,073\alpha} f^{0,123} - 10,579(1 - e^{-0,024d})} \quad (5)$$

Em (5)  $f$  é a frequência em GHz,  $R_{0,01}$  é a taxa de chuva (em mm/h) excedida em 0,01% do tempo e  $\alpha$  é o valor do

coeficiente obtido no item anterior, para a polarização especificada. O valor máximo recomendado para  $r$  é 2,5. Caso o cálculo de  $r$  resulte num valor maior que 2,5, deve-se usar  $r = 2,5$ . Assim, a atenuação devido à chuva, estimada no percurso para uma porcentagem de tempo  $p = 0,01\%$ , é dada por

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d_{\text{eff}} \quad (6)$$

Para outras porcentagens de tempo diferentes de 0,01%, compreendidas na faixa de 0,001% até 1%, a atenuação é calculada a partir da seguinte equação:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \quad (7)$$

sendo que

$$C_1 = 0,07^{C_0} \left[ 0,12^{(1-C_0)} \right] \quad (8)$$

$$C_2 = 0,855C_0 + 0,546(1 - C_0) \quad (9)$$

$$C_3 = 0,139C_0 + 0,043(1 - C_0) \quad (10)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4 \left[ \log_{10} (f/10)^{0,8} \right]; & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0,12 & ; f < 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (11)$$

Conforme a Rec. ITU-R P.838-3, essas expressões são válidas em qualquer parte do mundo para frequências até 100 GHz e comprimentos de radioenlace até 60 km.

### III. INFLUÊNCIA DA CHUVA NO ALCANCE DO ENLACE

#### A. Balanço de Potência

O desempenho de um radioenlace devido ao desvanecimento plano está associado ao balanço de potência do radioenlace. A equação do balanço de potência de um radioenlace pode ser obtida considerando-se os níveis de potência nos terminais das antenas transmissoras e receptoras e seus respectivos ganhos em relação à antena isotrópica, bem como da perda no espaço livre acrescida de outras perdas do sistema, ou seja,

$$P_T + G_T + G_R = P_R + \sum A \quad (12)$$

onde  $P_T$  e  $P_R$  são, respectivamente, as potências de transmissão e de recepção nos terminais das antenas, geralmente em dBm;  $G_T$  e  $G_R$  são, respectivamente, os ganhos das antenas de transmissão e de recepção, em dBi, e  $\sum A$  é o somatório das atenuações da saída do transmissor até a entrada do receptor, em dB, dada por

$$\sum A = A_E + A_D + A_{LT} + A_O \quad (13)$$

onde  $A_E$  é a atenuação no espaço livre;  $A_D$  é soma das atenuações nos duplexadores e nos derivadores,  $A_{LT}$  é a atenuação nos guias de ondas ou cabos coaxiais e  $A_O$  representa outras atenuações adicionais, tais como aquelas devido à absorção por gases e/ou vapor d'água, difração por

obstrução em obstáculos, desvanecimento por multipercursos, atenuação devido à chuva, dentre outras, quando aplicável.

Geralmente, radioenlaces em micro-ondas têm visada direta, ou seja, livre de obstáculos. Todos os valores das atenuações na expressão (13) devem estar em dB e, por conveniência, a expressão da atenuação no espaço livre pode ser dada pela seguinte expressão, com a distância  $d$  em km e a frequência  $f$  em GHz:

$$A_E = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) \quad (14)$$

A diferença entre a potência recebida  $P_R$  (em dBm) na ausência de desvanecimento plano e a potência de limiar  $P_L$  (em dBm) é definida como margem  $M$ , que em dB, é determinada por:

$$M = P_R - P_L \quad (15)$$

#### B. Determinação do Alcance

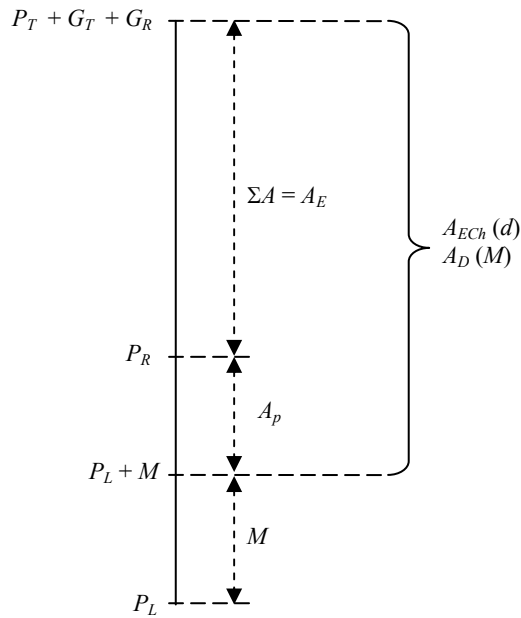
Para a determinação do alcance de um radioenlace operando sob chuva, algumas definições tornam-se necessárias. De acordo com o diagrama de níveis apresentado na Figura 3, a potência recebida na ausência de desvanecimento,  $P_R$ , só depende do somatório das atenuações fixas. As atenuações introduzidas pelos componentes de derivação e nos guias de onda foram desconsideradas em função da configuração e do tipo do equipamento considerado neste trabalho, ou seja, configuração com um canal bidirecional sem proteção (1+0) e equipamento acoplado diretamente à antena. Evidentemente, para outras configurações e com equipamentos instalados em abrigos, tais atenuações deverão ser consideradas. Portanto, para as condições definidas neste trabalho, o somatório das atenuações fixas se resume à atenuação no espaço livre,  $A_E$ .

A soma da atenuação no espaço livre,  $A_E$ , com a atenuação produzida pela chuva,  $A_p$ , resulta na atenuação combinada  $A_{ECh}(d)$ , assim definida pelo fato de ambas serem dependentes da extensão do radioenlace. Por outro lado, para um dado conjunto de antenas, par transmissor/receptor e margem para desvanecimentos planos, podem ser obtidos dois valores: um dado pela soma ( $P_T + G_T + G_R$ ) e o outro dado pela soma ( $P_L + M$ ).

A diferença de nível entre os dois valores pode ser definida como sendo a atenuação disponível,  $A_D(M)$ , necessária para acomodar a atenuação combinada  $A_{ECh}(d)$ . Isso quer dizer que  $A_D(M)$  representa um limite físico para o radioenlace e, como consequência, um radioenlace será realizável se:

$$A_{ECh}(d) \leq A_D(M). \quad (16)$$

Evidentemente, a maior distância para que um radioenlace seja exequível será aquela obtida quando  $A_{ECh}(d) = A_D(M)$ .


 Figura 3. Diagrama de níveis para a definição de  $A_{ECh}(d)$  e de  $A_D(M)$ .

Por meio das equações (1), (4), (5), (6), (7), (13), (14), (15) e (12), podem ser obtidas as seguintes equações:

$$A_{ECh}(d) = 92,44 + 20 \log(d \cdot f) + \frac{k \cdot R_{0,01}^\alpha \cdot d \cdot C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)}}{0,477 d^{0,633} R_{0,01}^{0,073 \alpha} f^{0,123} - 10,579 (1 - e^{-0,024 d})} \quad (17)$$

e

$$A_D(M) = P_T + G_T + G_R - P_L - M. \quad (18)$$

Os valores práticos de margem  $M$  para a garantia da confiabilidade, em função dos desvanecimentos planos, podem variar desde poucos decibéis até aproximadamente 50 dB. Assim, neste trabalho, será considerada a faixa de 0 a 50 dB para a margem, a fim de se obter os respectivos valores para  $A_D(M)$ . Dessa forma, é possível associar, para vários cenários, os alcances em função da atenuação adicional produzida por chuva.

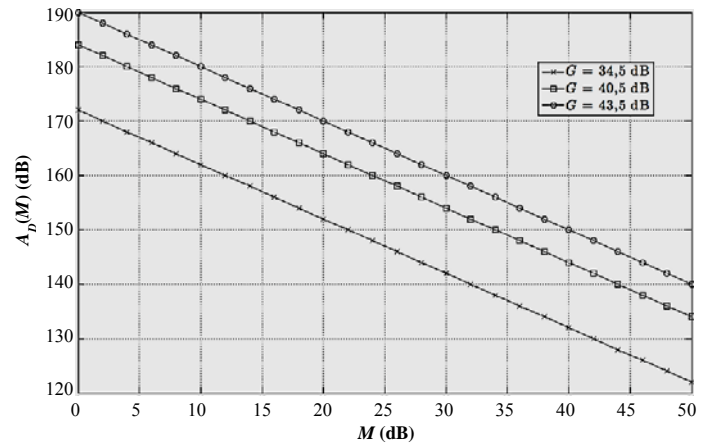
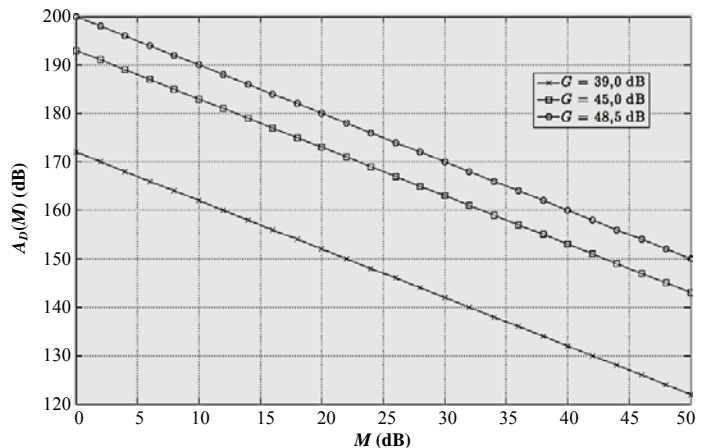
### C. Resultados para as Análises do Alcance

Para o estudo proposto, os parâmetros típicos de projeto de radioenlaces, apresentados na Tabela VII, foram considerados para a realização dos cálculos de alcance.

A partir dos dados da Tabela VII, para cada frequência de projeto, tem-se três possibilidades de ganhos para as antenas, considerando-as iguais nas duas estações. Logo, a faixa de valores de  $A_D(M)$  em dB, para as condições propostas, resultam nas curvas apresentadas nas Figuras 4, 5, 6 e 7.

TABELA VII  
PARÂMETROS TÍPICOS DE PROJETOS DE RADIOENLACE.

Parâmetros	Valores
Taxa de Transmissão	155 Mbit/s (STM-1)
Potência de Transmissão	30 dBm
Limiar de Recepção (BER = 10 <sup>-6</sup> )	-73 dBm
Confiabilidade	99,999%
Frequências	11,5 GHz; 19,5 GHz; 22,5 GHz e 39,0 GHz
Antenas (11,5 GHz)	$\phi = 0,6$ m; G = 34,5 dBi $\phi = 1,2$ m; G = 40,5 dBi $\phi = 1,8$ m; G = 43,5 dBi
Antenas (19,5 GHz)	$\phi = 0,6$ m; G = 39,0 dBi $\phi = 1,2$ m; G = 45,0 dBi $\phi = 1,8$ m; G = 48,5 dBi
Antenas (22,5 GHz)	$\phi = 0,6$ m; G = 40,0 dBi $\phi = 1,2$ m; G = 46,0 dBi $\phi = 1,8$ m; G = 49,5 dBi
Antenas (39,0 GHz)	$\phi = 0,6$ m; G = 39,8 dBi $\phi = 1,2$ m; G = 46,6 dBi
Taxas de Chuvas (p = 0,01%)	R <sub>0,01</sub> = 60 mm/h; 80 mm/h e 100 mm/h


 Figura 4. Faixa de valores de  $A_D(M)$  para as antenas de 11,5 GHz.

 Figura 5. Faixa de valores de  $A_D(M)$  para as antenas de 19,5 GHz.

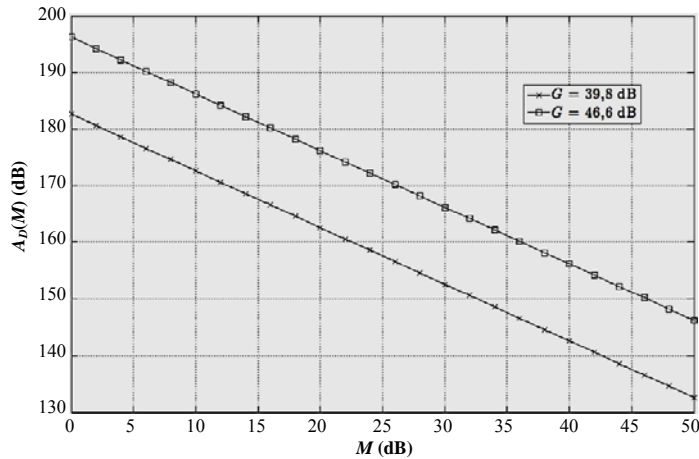


Figura 6. Faixa de valores de  $A_D(M)$  para as antenas de 22,5 GHz.

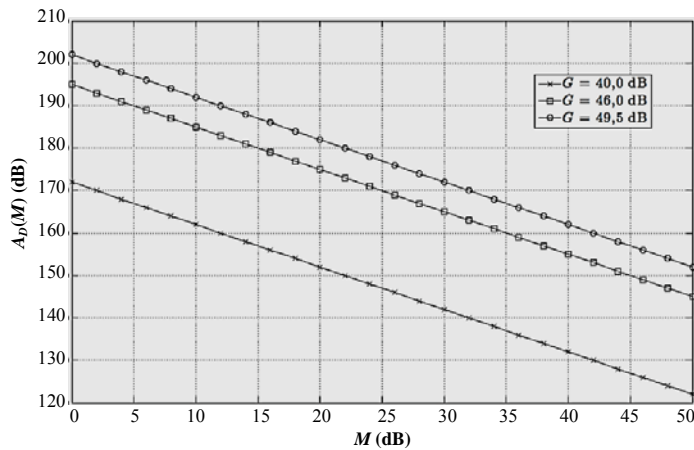


Figura 7. Faixa de Valores de  $A_D(M)$  para as antenas de 39,0 GHz.

Por sua vez, pode-se obter os valores de  $A_{ECh}(d)$  para  $d$  de 0 a 60 km, por meio da equação (17) para os diferentes valores de taxa de chuva, para cada uma das frequências indicadas na Tabela VII, considerando polarização horizontal (pior caso), com  $k = k_H$  e  $\alpha = \alpha_H$ , conforme Tabelas III e V. Os resultados são apresentados nas Figuras 8, 9, 10 e 11.

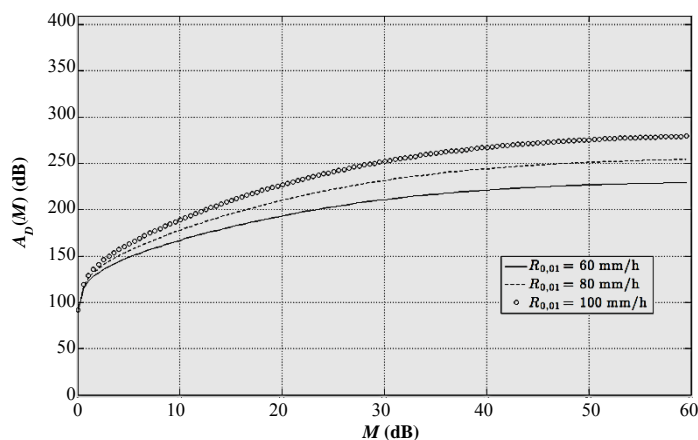


Figura 8. Curvas  $A_{ECh}(d)$  para a frequência de 11,5 GHz e para as taxas de chuva  $R_{0,01}$  de 60 mm/h, 80 mm/h e 100 mm/h.

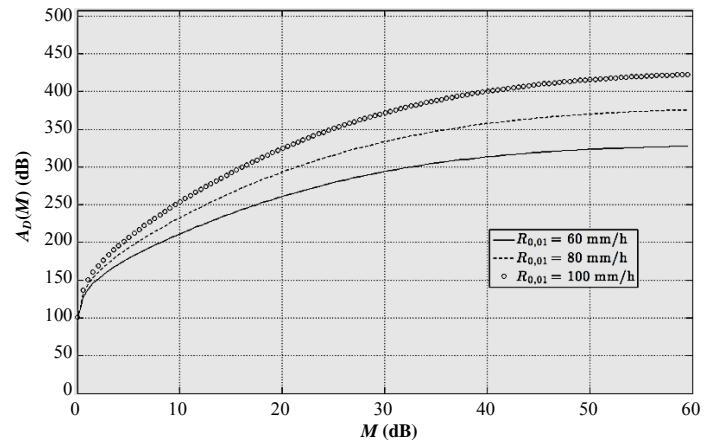


Figura 9. Curvas  $A_{ECh}(d)$  para a frequência de 19,5 GHz e para as taxas de chuva  $R_{0,01}$  de 60 mm/h, 80 mm/h e 100 mm/h.

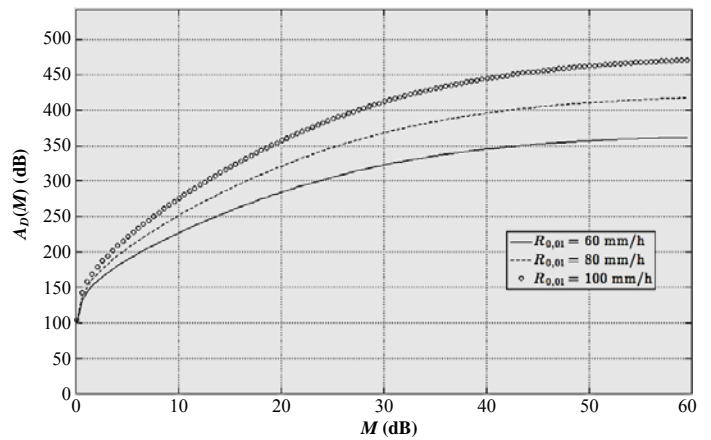


Figura 10. Curvas  $A_{ECh}(d)$  para a frequência de 22,5 GHz e para as taxas de chuva  $R_{0,01}$  de 60 mm/h, 80 mm/h e 100 mm/h.

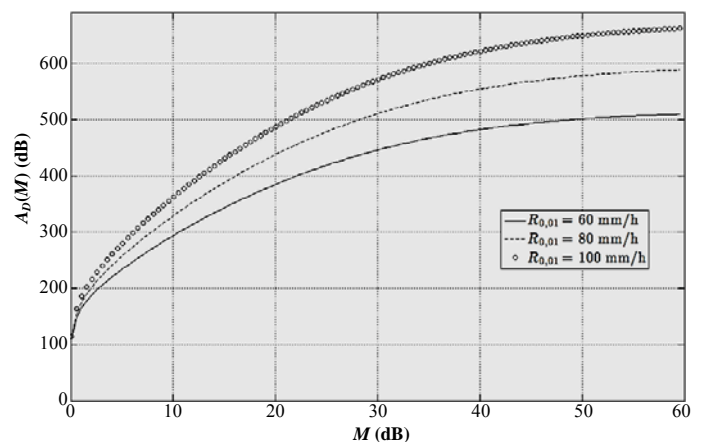


Figura 11. Curvas  $A_{ECh}(d)$  para a frequência de 39,0 GHz e para as taxas de chuva  $R_{0,01}$  de 60 mm/h, 80 mm/h e 100 mm/h.

Para a determinação do alcance  $d$ , primeiro deve-se determinar a margem  $M$  de acordo com as condições de propagação para tempo seco em função da confiabilidade especificada para o radioenlace. De acordo com as Figuras 4, 5, 6 e 7, para uma dada margem  $M$ , determina-se o valor de

$A_D(M)$ . Depois, faz-se  $A_{ECh}(d) = A_D(M)$  e, por meio das Figuras 8 a 11, encontra-se o valor máximo de alcance  $d$ , de modo que o radioenlace apresente a confiabilidade especificada.

Por exemplo, supondo que a margem escolhida seja  $M = 30$  dB, que a frequência seja  $f = 11,5$  GHz, que a antena seja a de menor ganho ( $G = 34,5$  dBi) e que a taxa de chuva seja  $R_{0,01} = 80$  mm/h. Através da Figura 4, obtém-se  $A_D(M) = 142$  dB. Usando esse valor na equação (16) e usando a Figura 8, encontra-se o alcance  $d \cong 2,74$  km.

Em um outro exemplo, usando também  $M = 30$  dB e  $f = 11,5$  GHz, mas com a antena de maior ganho ( $G = 43,5$  dBi), encontra-se  $A_D(M) = 160$  dB e obtém-se  $d \cong 5,86$  km.

Finalmente, a título de comparação, a Tabela VIII apresenta os alcances para ausência de chuva ( $R_{0,01} = 0$ ) e para chuvas com taxa igual a 80 mm/h, nas frequências de 11,5 GHz, 19,5 GHz e 39,5 GHz, para os conjuntos de antenas considerados neste trabalho. Para a ausência de chuva considerou-se apenas a margem  $M$  obtida a partir das condições de propagação para tempo seco. E para ambos os casos, foram desprezadas as outras perdas além da perda no espaço livre. Deve-se ressaltar que os alcances apresentados na Tabela VIII não levam em consideração qualquer característica geodésica, mas apenas as condições de propagação em tempo seco e com chuva.

Os resultados apresentados na Tabela VIII mostram claramente a limitação de alcance provocada pela chuva, já em 11,5 GHz, em que, por exemplo, para um ganho considerado igual a 34,5 dBi, tem-se um alcance igual a 2,74 km com chuva contra 26,14 km para tempo seco. Não se levou em consideração a curvatura terrestre. As distâncias sem chuva estão apresentadas apenas para exemplificar a magnitude do efeito da chuva no radioenlace.

TABELA VIII

COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS CONSIDERANDO A ATENUAÇÃO POR CHUVA E APENAS A ATENUAÇÃO DE ESPAÇO LIVRE ( $R_{0,01} = 0$ ).

$M$ (dB)	$f$ (GHz)	$G$ (dBi)	$R_{0,01}$ (mm/h)	$A_D(M)$ (dB)	$d$ (km)
30	11,5	34,5	80	142,0	2,74
		43,5		160,0	5,86
		34,5	0	142,0	26,14
		43,5		160,0	207,64
30	19,5	39,0	80	151,0	1,42
		45,0		163,0	2,23
		39,0	0	151,0	43,45
		45,0		163,0	172,97
30	39,0	39,8	80	152,6	0,47
		46,6		166,2	0,78
		39,8	0	152,6	26,12
		46,6		166,2	125,01

#### IV. CONCLUSÕES

Apesar de já existirem modelos estatísticos com desempenho significativamente superiores ao modelo recomendado pela ITU, que permitem prever o comportamento estatístico da atenuação por chuva, medidas realizadas no Brasil mostraram que o modelo atualmente recomendado pela ITU-R continua sendo o mais apropriado para aplicações em termos globais, conforme consta em [9],

onde foi feito estudo comparativo entre vários modelos.

Neste trabalho, analisando as curvas  $A_{ECh}$  das Figuras 8, 9, 10 e 11 e os resultados da Tabela VIII, verifica-se que o impacto da chuva é bastante significativo no alcance do radioenlace. Para uma mesma margem de desvanecimento, a chuva pode limitar fortemente o alcance do radioenlace, ficando demonstrado claramente que a limitação é maior quanto maior for a frequência de operação.

Um engenheiro projetista deve estar atento às limitações impostas pela chuva para radioenlaces que operam em frequências a partir de aproximadamente 10 GHz. Um bom projeto deve garantir a confiabilidade desejada frente às degradações provocadas pelas condições de propagação. Desta forma, deve-se levar em conta no projeto, principalmente, os seguintes pontos:

- a) a localização em que o radioenlace vai operar; e
- b) as opções de antenas e equipamentos comerciais disponíveis no mercado.

A localização em que o radioenlace vai operar influencia tanto na propagação em tempo seco quanto na propagação com chuva, em função das condições geoclimáticas da região. Já as características dos equipamentos, tais como ganho das antenas, perdas extras próprias das configurações usadas e potência de limiar de recepção, afetam diretamente o desempenho do radioenlace, conforme mostrado por meio de (12) e (15). Além disso, as limitações impostas por tais condições pode inviabilizar um radioenlace para valores severos de confiabilidade. Por este motivo, confiabilidades acima de 99,999%, obtidas exclusivamente em função das condições de propagação, podem ser muito difíceis de serem obtidas, mesmo para radioenlaces de curtíssimos alcances.

Dessa forma, conclui-se que a análise da atenuação por chuvas em radioenlaces que operam em frequências superiores a 10 GHz é de fundamental importância para o apropriado dimensionamento desses sistemas, em especial aqueles que operam com altos requisitos de confiabilidade e disponibilidade.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Ryde, J. W., e D. Ryde (1945), *Attenuation of centimeter waves by rain, hail, fog and clouds*. Wemby, England: Research Labs of General Electric, Rep. No. 8670, 1945.
- [2] Bean, B. R., e Dutton, E. J., *Radio Meteorology*. Boulder, Colorado: Central Radio Propagation Laboratory, 1966, pp. 270.
- [3] Garcia, N. A. P. *Modelamento de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto*. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, PUC-RJ, 2003.
- [4] Recommendation ITU-R P.530-15. *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. Geneva, 2013.
- [5] Recommendation ITU-R P.838-3. *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. Question ITU-R 201/3, 2005.
- [6] Ribeiro, J. A. J. *Propagação das Ondas Eletromagnéticas – Princípios e Aplicações*. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2004.
- [7] Recommendation ITU-R P.837-6. *Characteristics of precipitation for propagation modelling*. Geneva, 2012.
- [8] Gomes, G. G. R. *Sistemas de Radioenlaces Digitais – Terrestre e por Satélites*. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2013.
- [9] Arruda, Benedito A., “Estudo Comparativo das Técnicas para Cálculo de Atenuação devido à Chuva” Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2008.

**Hygson Assef Pereira da Rocha** nasceu em Manaus, AM, em 20 de novembro de 1979. É engenheiro de comunicações graduado pelo Instituto Militar de Engenharia (2002), pós-graduando em Engenharia de Redes e Sistemas de Telecomunicações (Inatel) e mestrando em Engenharia Elétrica, ênfase em Sistemas de Comunicações (PUC-RJ).

De 2003 a 2005, trabalhou como engenheiro militar no Exército Brasileiro, prestando suporte técnico e consultoria relativa à aquisição de equipamentos de telemática (centrais telefônicas, rádios, roteadores, etc), à contratação e implantação de redes de comunicações. Desde 2005, trabalha na Agência Nacional de Telecomunicações, no cargo de Especialista em Regulação, realizando atividades de autorização para uso de radiofrequências, autorização para exploração de serviços de telecomunicações/rádiodifusão e licenciamento de estações. Seus temas de interesse principais são Sistemas de Comunicações, Radiodifusão, Radiopropagação e Regulamentação.

**Geraldo Gil Ramundo Gomes** nasceu em Barra Mansa, RJ, em 26 de agosto de 1956. Graduiu-se em Engenharia de Operação em Telecomunicações (1979) e em Engenharia Elétrica Opção Eletrônica (1981) no Inatel. Obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica nas áreas de Eletrônica e Comunicações (1997) e o grau de Doutor nas áreas de Telecomunicações e Telemática (2002) na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Passou por estágio Pós-Doutor na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, de dezembro de 2009 a dezembro de 2010.

Desde o início de 1991, é professor de tempo integral da Fundação Instituto Nacional de Telecomunicações, onde ocupa o cargo de Professor Titular desde 1992. Suas principais áreas de interesse são os Sistemas de Comunicações Digitais, mais especificamente Codificação de Canal, Sistemas de Radioenlaces Digitais Terrestre e por Satélites, e TV Digital.

É autor do livro *Sistemas de Radioenlaces Digitais Terrestres e por Satélites*, publicado em fevereiro de 2013 pela Editora Érica.