

Referências Bibliográficas

- [1] BARCLAY, L. W.. **Propagation of Radiowaves, 2nd Edition**. The Institute of Electrical Engineers.
- [2] ALBUQUERQUE, J. P. D. A.; FORTES, J. M. P. ; FINAMORE, W. A.. **Modelos Probabilísticos em Engenharia Elétrica**. Centro de Estudos em Telecomunicações, PUC-Rio.
- [3] **Error performance of an international digital connection forming part of an integrated services digital network**. Technical Report ,Recomendação ITU-T G.821, 1988.
- [4] SAMPAIO NETO, R.. **Técnicas de modulação/demodulação**. PTTD-Programa de Treinamento em Transmissão Digital, Embratel, 1988.
- [5] MINKIN, V.; VOSCHININ, A.. **Asymptotic method for predicting error performance parameters and objectives for constant bit rate digital paths carried by digital radio-relay systems**. Journal of Radio Electronics, 2000.
- [6] HOWELL, BOB ABD PINE, M.; CHEESEMAN, C.; TAYLOR, H. ; TOMLINSON, J.. **A review of error performance & availability in meeting international obligations based upon ITU recommendations**. (Working Document for the RSSPWG), 2001.
- [7] **End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections**. Technical Report , Recomendação ITU-T G.826, 2002.
- [8] **Error performance and availability estimation for synchronous digital hierarchy terrestrial fixed wireless systems**. Technical Report ,Recomendação ITU-R F.1605, 2003.
- [9] **Characteristics of precipitation for propagation modelling**. Technical Report , Recomendação ITU-RP.837-4, 2003.
- [10] **Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems**. Technical Report , Recomendação ITU-RP.530-11, 2005.
- [11] **Specific attenuation model for rain for use in prediction methods**. Technical Report , Recomendação ITU-RP.838-3, 2005.

- [12] **Conversion of annual statistics to worst-month statistics.** Technical Report , Recomendação ITU-R P.841-4, 2005.
- [13] **FORTES, J. M. P.. On the power flux-density limits to protect the fixed service from HEO FSS satellites emissions in the 18 GHz band.** International Journal of Satellite Communications, 2006.

A**Cálculo do valor esperado de uma variável aleatória a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade**

O valor esperado de uma variável aleatória w é definido por

$$E[w] = \int_{-\infty}^{\infty} W p_w(W) dW \quad (\text{A-1})$$

Onde $p_w(W)$ é a função densidade de probabilidade da variável w .

A probabilidade t da variável aleatória w não exceder um valor W define a Função Distribuição de Probabilidade, $F_w(W)$, de w , ou seja,

$$\begin{aligned} t &= F_w(W) \\ &= \int_{-\infty}^W p_w(\alpha) d\alpha \end{aligned} \quad (\text{A-2})$$

Supondo que w é uma variável aleatória contínua, a inversão da relação em (A-2) permite escrever

$$W = F_w^{-1}(t) \quad (\text{A-3})$$

Considerando-se (A-3), uma mudança na variável de integração em (A-1) conduz a

$$E[w] = \int_{-\infty}^{\infty} W p_w(W) dW = \int_0^1 F_w^{-1}(t) dt \quad (\text{A-4})$$

Note que, na obtenção de (A-4), considerou-se ainda, a partir de (A-2), que

$$dt = F_w'(W)dW = p_w(W)dW \quad (A-5)$$

Considerando-se as propriedades da FDP de uma variável aleatória, é fácil concluir que

$$\int_0^1 F_w^{-1}(t)dt = \int_{-\infty}^0 F_w(W)dW + \int_0^{\infty} (1 - F_w(W))dW \quad (A-6)$$

Tem-se, assim, de (A-6) e (A-4)

$$E[w] = \int_{-\infty}^0 F_w(W)dW + \int_0^{\infty} (1 - F_w(W))dW \quad (A-7)$$

Finalmente, sendo a FDPC de w definida por

$$C_w(W) = 1 - F_w(W) \quad (A-8)$$

tem-se

$$E[w] = \int_{-\infty}^0 (1 - C_w(W))dW + \int_0^{\infty} C_w(W)dW \quad (A-9)$$

B**Limitantes para o valor esperado de variáveis aleatórias não negativas definidas em um intervalo finito, quando a FDPC não é conhecida em todo o intervalo**

Como apresentado no Apêndice A, o valor esperado de uma variável aleatória pode ser calculado a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa.

Considere uma variável w , que assume valores em um intervalo finito $I = [A_1, A_2]$, onde $A_2 > A_1 \geq 0$.

Neste caso, (A-9) se escreve

$$E[w] = \int_{A_1}^{A_2} C_w(W) dW + A_1 \quad (\text{B-1})$$

No caso de $C_w(W)$ ser conhecida somente num intervalo $[a_1, a_2]$, é correto expressar (B-1) como

$$\begin{aligned} E[w] &= \int_{A_1}^{a_1} C_w(W) + \int_{a_1}^{a_2} C_w(W) dW + \int_{a_2}^{A_2} C_w(W) dW + A_1 \\ &= I_1 + A + I_2 + A_1 \end{aligned} \quad (\text{B-2})$$

Em (B-2), a parcela A é conhecida, ou seja, pode ser determinada pela integral de $C_w(W)$ no intervalo $[a_1, a_2]$. No entanto, as parcelas I_1 e I_2 correspondem aos intervalos onde $C_w(W)$ não é conhecida. Note que os valores mínimos destas parcelas ocorrem quando

$$C_w(W) = \begin{cases} C_w(a_1) & , A_1 \leq W \leq a_1 \\ 0 & , a_2 \leq W \leq A_2 \end{cases} \quad (\text{B-3})$$

enquanto que seus valores máximos são obtidos quando

$$C_w(W) = \begin{cases} 1 & , A_1 \leq W \leq a_1 \\ C_w(a_2) & , a_2 \leq W \leq A_2 \end{cases} \quad (\text{B-4})$$

Os limitantes inferiores e superiores para I_1 e I_2 são, então, dados, respectivamente, por

$$C_w(a_1)(a_1 - A_1) \leq I_1 \leq a_1 - A_1 \quad (\text{B-5})$$

$$0 \leq I_2 \leq C_w(a_2)(A_2 - a_2) \quad (\text{B-6})$$

A partir de (B-5) e (B-6) são obtidos os limitantes inferior e superior do valor esperado da variável w . São eles

Limitante Inferior

$$E[w] \geq C_w(a_1)(a_1 - A_1) + \int_{a_1}^{a_2} C_w(W)dW + A_1 \quad (\text{B-7})$$

Limitante Superior

$$E[w] \leq a_1 + \int_{a_1}^{a_2} C_w(W)dW + C_w(a_2)(A_2 - a_2) \quad (\text{B-8})$$

C Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa da atenuação devido à chuva.

C.1 Estatística anual da atenuação devida à chuva

A estatística da atenuação devido à chuva foi estimada pelo procedimento contido na Recomendação ITU-R P.530-11 que permite determinar os valores de atenuação A_P excedidos por uma percentagem P do tempo de observação em um enlace de comprimento d (km) operando na frequência f (GHz) com polarização especificada.

É determinado, primeiramente, o valor da atenuação $A_{0,01}$, em dB, a ser excedida em 0,01% do tempo. Este valor é calculado por

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} \quad (C-1)$$

Onde γ_R é a atenuação específica em dB/km e d_{eff} é a distância efetiva. Esses valores são calculados pelos métodos apresentados a seguir.

Cálculo de γ_R

Pela Recomendação ITU-R P.838-3 [11], a atenuação específica γ_R é calculada por

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (C-2)$$

onde R é a taxa de chuva em mm/h. Os valores de $R_{0,01}$ excedidos por 0,01% do ano médio são encontrados nos mapas da Recomendação ITU-R P.837-4 .

Os valores k e α são calculados por

$$k = [k_V + k_H + (k_H - k_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2 \quad (C-3)$$

$$\alpha = [k_V\alpha_V + k_H\alpha_H + (k_H\alpha_H - k_V\alpha_V)\cos^2\theta\cos 2\tau]/2k \quad (C-4)$$

Em (C-4), θ é o ângulo de elevação e τ é o ângulo de polarização. As constantes k_V , k_H , α_V e α_H nessa expressão são encontradas nas tabelas da Recomendação ITU-R P.838.3 e dependem da frequência utilizada.

Cálculo de d_{eff}

A distancia efetiva d_{eff} é calculada por

$$d_{eff} = d \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (C-5)$$

Para $R_{0,01} \leq 100 \text{ mm/h}$

$$d_0 = 35e^{-0,015R_{0,01}} \quad (C-6)$$

Para latitudes entre $30^\circ S$ e $30^\circ N$, as atenuações A_P a serem excedidas em $P\%$ do tempo são calculadas por

$$\frac{A_P}{A_{0,01}} = 0,07P^{-(0,855+0,139\log_{10}P)} \quad (C-7)$$

onde $A_{0,01}$ é dado por (C-1).

A equação acima foi utilizada para determinar a estatística anual da atenuação causada pela chuva e é válida para porcentagens P entre 0,001% e 1%.

C.2

Estatística da atenuação devida à chuva para o pior mês

O procedimento apresentado na Seção C.1 deste Apêndice permite determinar a estatística anual para a atenuação devido à chuva. Para o cálculo da estatística relativa ao pior mês, foi utilizado o método da Recomendação ITU-R P.841-4 [12]. Segundo este método, sendo P a porcentagem de tempo em que a atenuação A_P é excedida para o período de um ano e P_w a porcentagem em que a mesma atenuação é excedida no período relativo ao pior mês, para $P \leq 3\%$, tem-se que

$$P_w = \begin{cases} 12P & , P < \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} \\ Q_1 P^{1-\beta} & , \left(\frac{Q_1}{12}\right)^{1/\beta} < P \leq 3 \end{cases} \quad (C-8)$$

onde os parâmetros Q_1 e β , que dependem da região climática, são encontrados nas tabelas da Recomendação ITU-R P.841-4 [12].