Caracterização e Capacidade de Canais Sem Fio entre Plataforma HAPs e Receptor Terrestre

Raquel Mendonça Gonçalves, Vitor de Aguiar Carazza e Ugo Silva Dias

Resumo— Devido aos avanços nos meios de comunicação que utilizam as altitudes próximas ao espaço, é preciso compreender melhor a influência da chuva, das nuvens e dos gases atmosféricos no nível do sinal. O presente artigo traz ajustes no modelo de perda de percurso no espaço livre para considerar esses efeitos climáticos no enlace entre um receptor na terra e uma plataforma HAPs em Brasília. Além disso, é realizado também um estudo de capacidade do canal para este tipo de comunicação. Ao final, é mostrado que os efeitos climáticos alteram consideravelmente a atenuação do sinal, e, a depender das características de desvanecimento do canal, a capacidade ergódica indica as possíveis taxas de serem trafegadas para determinada relação sinal-ruído.

Palavras-Chave—HAPs, atenuação por efeitos climáticos, perda de percurso, capacidade de Shannon, capacidade ergódica.

Abstract— Due to advances in near space vehicle communication, it is necessary to comprehend the influence of rain, clouds and atmospheric gases at the signal level. The present article brings adjustments in the free space pathloss model to consider these climatic effects in the link between a receiver on the ground and a HAPs platform in Brasilia. In addition, the channel capacity is also verified for this communication link. At the end, it is shown that climate change will considerably alter signal attenuation, and, depending on channel fading characteristics, the ergodic capacity indicates the possible rate for a specific signal noise ratio.

Keywords— HAPs, attenuation due to climatic effects, pathloss, Shannon capacity, ergodic capacity.

I. INTRODUÇÃO

Em um contexto em que a comunicação é essencial para o desenvolvimento humano, a busca por meios alternativos para provê-la é objeto constante da área de pesquisa e desenvolvimento de todos os países. As plataformas HAPs (do inglês, *High Altitude Platforms*) são uma opção para complementar o fornecimento de serviço de comunicação sem fio. Essas plataformas foram inventadas para corresponder à ideia de posicionar um objeto transmissor (aeronaves, balões, dirigíveis e/ou veículos não tripulados) voando em uma altitude entre 17 e 30 km acima do chão [1], [2].

O estudo de HAPs surgiu em 1950, juntamente com a invenção dos satélites, sendo continuado nos anos 1990 pelas ESA (do inglês, *European Space Agency*) e ITU (do inglês, *International Telecommunication Union*) por ser um método de comunicação alternativo aos sistemas terretres e de satélites [1]. Nos últimos anos, foi evidenciado um crescimento nas pesquisas e aplicações de HAPs nas redes de comunicação.

Os autores pertencem ao Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, e agradecem o apoio da CAPES. E-mails: raquel.goncalves@redes.unb.br, vitor.carazza@redes.unb.br e udias@unb.br As recentes expectativas com os avanços no uso de HAPs são refletidas principalmente nos investimentos feitos por grandes empresas na implementação dessa tecnologia. A exemplo do Facebook e da Google que já realizaram testes práticos com, respectivamente, um veículo aéreo não tripulado (Aquila UAV - Figura 1a) e um balão (*Project* Loon - Figura 1b) e têm planos de construírem redes sem fio em diversas localidades com o uso dessa tecnologia.



Fig. 1. Exemplos recentes de uso de HAPs.

Como em toda comunicação sem fio, o enlace em HAPs é influenciado por efeitos de propagação intrínsecos como chuva, nuvens, absorção gasosa e multipercurso. Esses efeitos são dinâmicos, aleatórios e relevantes, o que dificulta apurar com precisão seus impactos na propagação do sinal. Outro desafio no estudo dessa tecnologia é modelar o canal de comunicação com um transmissor que fica em constante deslocamento pela estratosfera.

Com o intuito de colaborar com os avanços no uso dessa forma de comunicação, este trabalho tem por objetivo caracterizar a influência de chuvas, nuvens e gases atmosféricos na atenuação do sinal, ajustar o modelo de perda de percurso e estudar a capacidade do canal para um enlace de comunicação entre um receptor fixo localizado em Brasília/DF e um HAPs.

Para isso, são implementados no *software* Mathematica modelos e equações mais recentes de atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa desenvolvidos pela ITU. Assim é possível visualizar a intensidade da atenuação conforme a frequência de operação e a distância entre o HAPs e o receptor terrestre. O ajuste consiste na combinação das atenuações desses fenômenos (atmosféricos e climáticos) com o modelo de atenuação no espaço livre e será utilizado para analisar a potência recebida pelo receptor em Brasília. Por fim, o estudo de capacidade do canal leva em conta o modelo de Shannon para canais determinísticos e o modelo de desvanecimento κ - μ Sombreado para canais aleatórios/não determinísticos.

II. CARACTERIZAÇÃO DA PERDA DE PERCURSO

A perda de percurso de um sinal consiste na atenuação ou decaimento da potência ao longo da distância entre transmissor e receptor, que acarretará na diminuição da potência recebida.

O modelo mais utilizado para descrever a potência recebida é o modelo de Friis, descrito na Equação (1).

$$P_r(dBm) = P_t + G_t + G_r - Loss, \tag{1}$$

em que P_r , P_t , G_t , G_r e *Loss*, respectivamente, potência recebida, potência transmitida, ganho na transmissão, ganho na recepção e atenuação (perdas) no percurso.

A atenuação utilizada no modelo de Friis costuma se basear no modelo de atenuação do espaço livre (FSPL) definido pelo IEEE (Std. 145, 1983) e descrito por

$$FSPL(dB) = 20\log_{10} d + 20\log_{10} f + 99.44 \quad , \quad (2)$$

em que d e f são respectivamente a distância em km entre o transmissor e o receptor e a frequência em GHz do sinal.

Entretanto este modelo de atenuação não leva em consideração os efeitos da chuva, das nuvens, dos gases atmosféricos e outros, de forma que descrever o enlace entre receptor e HAPs apenas com a atenuação do espaço livre pode ser superficial, otimista e distante da realidade. Para complementar o modelo FSPL, este artigo mostra a implementação de modelos ITU-R para os efeitos de atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa.

A. Atenuação por Chuva

Em contato com as gotas de chuva, o sinal é absorvido, espalhado e consequentemente atenuado, especialmente nas frequências acima de 10 GHz [5]. O modelo da ITU-R mais recente, [5] a [8], para a atenuação por chuva foi o escolhido para a implementação neste trabalho. Neste caso, a atenuação prevista para o percentual p de chuva excedida igual a 0,01% de um ano médio é definida como

$$A_{0.01}(dB) = r_R L_E \quad , \tag{3}$$

em que r_R e L_E são respectivamente a atenuação de chuva específica em (dB/km) e o comprimento de caminho específico (km), ambos descritos no modelo ITU.

Para outros percentuais de tempo para a chuva excedida em um ano médio, mais especificamente, para p no intervalo de 0,001% a 10%, a atenuação em dB pode ser estimada pela Equação (4) de extrapolação,

$$A_{R}(p) = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01}\right)^{-[0.655+0.033\ln(p)-0.045\ln(A_{0.01})-\beta(1-p)\sin\theta]}.$$
(4)

Se $p \ge 1\%$, então β =0, se p < 1%, β pode ser expresso conforme a Equação (5), em que φ é a latitude da região em graus.

$$\beta = \begin{cases} 0, & |\varphi| \ge 36^{\circ} \\ -0.005(|\varphi| - 36), & |\varphi| < 36^{\circ} \quad e \quad \theta \ge 25^{\circ} \\ -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25\sin\theta, \\ |\varphi| < 36^{\circ} \quad e \quad \theta < 25^{\circ} \end{cases}$$
(5)

B. Atenuação por Nuvens

Nas nuvens a atenuação se dá por absorção do sinal e depende da temperatura e da quantidade de água ao longo do percurso. De acordo com a recomendação da ITU [9], a atenuação por nuvens é dada por

$$A_C(dB) = \frac{LK_l}{\sin\theta}, \quad 90^\circ \ge \theta \le 5^\circ \quad , \tag{6}$$

em que L (kg/m²) corresponde ao conteúdo colunar total de água líquida, θ ao ângulo de elevação e K_l é o coeficiente de atenuação específica, detalhados em [9].

C. Atenuação por Absorção Gasosa

A atenuação devido à absorção por gases atmosféricos depende principalmente da frequência, do ângulo de inclinação, da altitude acima do nível do mar e da densidade de vapor de água (umidade absoluta). O modelo da ITU [10] para essa atenuação é representado por

$$A_G = \frac{h_o \gamma_o + h_w \gamma_w}{\sin \theta} \quad , \tag{7}$$

em que h_o é a altura equivalente de ar seco, h_w é a altura equivalente de vapor de água (km), γ_o é a atenuação específica do ar seco (dB/km), γ_w é a atenuação específica do vapor de água (dB/km) e θ é o ângulo de elevação, descritos em [10].

D. Ajuste no Modelo de Perda de Percurso

A atenuação correspondente aos efeitos climáticos e atmosféricos [5] é representada por

$$A_T = A_G + A_C + A_R(p) \quad , \tag{8}$$

em que A_G é a atenuação por absorção gasosa, A_C por nuvens e A_R por chuva.

Dessa forma o ajuste de perda de percurso proposto neste trabalho consiste em utilizar a Equação (1) com o $Loss_2$ prosposto na Equação (9), no lugar do valor de Loss obtido originalmente conforme o modelo FSPL,

$$Loss_2(dB) = A_T + FSPL.$$
(9)

III. ESTUDO DE CAPACIDADE DO CANAL

A. Capacidade de Shannon

A capacidade de Shannon de um canal corresponde à taxa máxima de transmissão de dados sem erros que pode trafegar por meio dele. A unidade desta medida é bits por segundo e como obtê-la está descrito na Equação (10), sendo γ a relação sinal-ruído (SNR) e *B* a largura de banda,

$$C = B \log_2(1+\gamma). \tag{10}$$

Para determinar a relação sinal-ruído (razão entre as potências do sinal e do ruído), é preciso obter a potência do ruído, apresentada na Equação (11), na qual os parâmetros k, B, NF e T são, respectivamente, a constante de Boltzmann, a largura de banda do sinal, o fator de ruído e a temperatura absoluta,

$$N_{\rm in} = k \times B \times \rm NF \times T.$$
(11)

XXXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBrT2017, 3-6 DE SETEMBRO DE 2017, SÃO PEDRO, SP

B. Capacidade Ergódica

A capacidade ergódica (bps/Hz) é definida como a máxima taxa média atingida sobre todos os blocos de desvanecimento. Esta leva em consideração a distribuição probabilística da componente de variação do sinal por multipercurso (desvanecimento rápido).

Para caracterizar essa distribuição será utilizado o modelo generalizado κ - μ Sombreado [11] que engloba os casos especiais de Rice Sombreado, Rice, Nakagami, Gaussiana Unilateral, κ - μ e Rayleigh. Esse modelo possui três parâmetros principais que o definem:

- *m* : parâmetro de sombreamento;
- μ : número de *clusters* de multipercurso;
- κ : parâmetro relacionado à componente dominante do sinal.

A capacidade ergódica obtida em [11] para o modelo de desvanecimento κ - μ Sombreado é representada por

$$C_{erg} = \left(\frac{m}{\mu\kappa + m}\right)^{m-\mu} \frac{1}{\Gamma(\mu - m)\log(2)} \times G_{1,0:2,2:1,2}^{0,1:1,2:1,1} \begin{bmatrix} 1-\mu & | 1,1 & | 1+m-\mu & | \frac{\bar{\gamma}(\mu\kappa + m)}{0,1-\mu}, \frac{\bar{\mu}\kappa}{m} \end{bmatrix},$$
(12)

em que $G[\cdot]$ é a função Meijer G e $\bar{\gamma}$ é a SNR média do sinal, obtida por

$$\bar{\gamma} = P_r(dBm) - P_N(dBm), \tag{13}$$

em que P_N é a potência do ruído de fundo do canal.

IV. RESULTADOS

A. Configuração do Cenário de Análise

Para a obtenção dos resultados, as análises são realizadas para um receptor fixo na cidade de Brasília (coordenadas -15.78° N, -47.93° E) e um transmissor móvel, representando o HAPs. A posição inicial do HAPs é logo acima do receptor e este se desloca para o leste sem variar a sua altitude de 20 km. Para este cenário, a distância entre o receptor e transmissor (distância de rádio) varia de 20 a 102 km, dependendo do ângulo de inclinação ao longo do deslocamento. O esquemático do cenário de análise encontrase na Figura 2.



Fig. 2. Esquemático do Cenário de Análise.

Os parâmetros típicos utilizados para balanceamento do enlace de comunicação com uso de HAPs estão descritos na Tabela I [12] e os parâmetros referentes às condições climáticas na Tabela II, de acordo com [8], [9], [10] e com o Instituto Nacional de Meteorologia.

TABELA I Parâmetros principais para Balanceamento do Enlace

Parâmetros	Valores
Frequência de Operação (GHz)	20
Potência de Transmissão (W)	10
Ganho da Antena de Transmissão (dBi)	20
Ganho da Antena de Recepção (dBi)	35
Largura de Banda (MHz)	20
Fator de Ruído	3
Potência do Ruído de Fundo (dBm)	-95
Polarização	Vertical

TABELA II Parâmetros de condições climáticas

Parâmetros	Valores
Taxa de chuva para	80
p = 0,01% de um ano médio (mm/h)	80
Água líquida na nuvem para	2
p = 0,1% de um ano médio (kg/m ²)	5
Temperatura média (°C)	21
Densidade do vapor de água (g/m ³)	7.5

B. Análise da Atenuação por efeitos Climáticos e Atmosféricos

Neste estudo, a frequência de comunicação foi o único parâmetro variado e assumiu os valores de 10, 15, 20 e 25 GHz. O percentual excedido para chuva utilizado foi 0,01% de um ano médio. Dessa forma foi possível obter as curvas de atenuação por chuva, nuvens e absorção gasosa em função da distância de rádio, apresentadas nas Figuras 3, 4 e 5 respectivamente.



Fig. 3. Atenuação por chuva com p = 0,01% em função da distância.

Por meio dos resultados obtidos é possível observar que as atenuações nos três casos aumentam com a frequência. Além disso, dentre os tipos de atenuação analisados, a chuva é o fenômeno que tem mais efeito na comunicação, entretanto os outros dois não podem ser desprezados pois tornam o modelo de atenuação do sinal mais preciso.



Fig. 4. Atenuação por nuvens em função da distância.



Fig. 5. Atenuação por absorção gasosa em função da distância.

C. Análise da Atenuação por Chuva

Já nesta situação a frequência foi fixada em 20 GHz e o percentual p de chuva excedida em um ano médio foi variado, recebendo os valores de 0,01%, 0,1%, 1,0% e 10%, com as curvas de atenuação obtidas apresentadas na Figura 6.



Fig. 6. Atenuação para diferentes percentuais de chuva.

Conclui-se que as atenuações por chuva para p igual a 0,01% e 0,1% são muito mais significantes do que nos casos de p igual a 1,0% e 10%, sendo imprescindível para o planejamento da rede considerar o cenário de aumento da precipitação e sua consequente atenuação.

D. Análise da Potência Recebida

Por fim, neste estudo a frequência foi fixada em 20 GHz e o percentual p de chuva excedida em um ano médio foi variado, recebendo os valores de 0,01%, 0,1%, 1,0% e 10%, quanto menor o percentual maior a precipitação. Os resultados obtidos para a potência recebida de acordo com o ajuste proposto no modelo de perda de percurso são apresentados na Figura 7.



Fig. 7. Potência recebida para diferentes percentuais de chuva.

Observa-se que os efeitos climáticos e atmosféricos afetam consideravelmente a potência do sinal recebido, em comparação ao modelo de espaço livre, principalmente para os valores de p igual a 0,10% e 0,01%, ou seja, quando há uma maior precipitação.

E. Capacidade do Canal

1) Capacidade de Shannon: Ao implementar o cálculo da capacidade de Shannon para as potências recebidas representadas na Figura 7, foi possível observar a quantidade de bits por segundo que podem trafegar sem erro no canal em função da distância de rádio na Figura 8.



Fig. 8. Capacidade de Shannon para diferentes percentuais de chuva.

Observa-se que a capacidade do canal depende fortemente dos percentuais p de chuva. Especificamente em Brasília, onde há períodos no ano de muita chuva e também de forte seca, é adequado considerar os casos extremos de p igual a 0,01% e a 10,0%. Para os períodos de seca, a capacidade do canal decai de forma gradual e similar ao modelo de espaço livre. Por outro lado, em períodos de chuva, é esperado que o enlace de comunicação HAPs sofra forte impacto e fique limitado, neste cenário analisado, a aproximadamente uma distância de 100 km para p = 0,10% e 60 km para p = 0,01%.

2) Capacidade Ergódica: Já no caso da capacidade ergódica, a implementação se deu em função da distância de rádio e dos parâmetros do modelo de distribuição. Em um primeiro momento, configura-se $\kappa = 0.5$ e m = 1, varia-se o valor de μ e os resultados são apresentados na Figura 9. Nota-se que à medida que o número de *clusters* aumenta, a capacidade do canal cresce de forma significativa. Assim, quanto menor o valor de μ , mais limitada se torna a distância de rádio para obter uma taxa de transmissão desejada.



Fig. 9. Capacidade Ergódica do modelo $\kappa\text{-}\mu$ Sombreado com $\kappa=0.5$ e m=1.



Fig. 10. Capacidade Ergódica do modelo κ - μ Sombreado com $\mu = 0.1$ e m = 1.

Já em um segundo momento, configura-se $\mu = 0.1$ e m = 1, varia-se o valor de κ e os resultados são apresentados na Figura 10. Observa-se que quando há uma maior presença da componente principal do sinal em relação às componentes difusas ($\kappa = 12$), a capacidade é favorecida, da mesma forma como ocorre no modelo de desvanecimento de Rice. No terceiro caso, configura-se $\mu = 0.1$ e $\kappa = 6$, varia-se o valor de m e os resultados são apresentados na Figura 10. Observase que quanto maior o parâmetro de sombreamento, maior se torna a capacidade do canal.

Por fim, dado os cenários analisados, conclui-se que para obter certa taxa de transmissão é importante observar os parâmetros de desvanecimento do canal, de forma a limitar



Fig. 11. Capacidade Ergódica do modelo $\kappa\text{-}\mu$ Sombreado com $\mu=0.1$ e $\kappa=6.$

a distância entre o receptor e transmissor em um cenário com HAPs.

V. CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho e suas análises foi possível constatar a importância dos efeitos climáticos e atmosféricos no sinal em um enlace HAPs-terra, e a necessidade de considerá-los no modelo de perda de percurso para caracterizar a potência recebida e consequentemente a capacidade de Shannon. Por meio do estudo do modelo de desvanecimento κ - μ Sombreado, observa-se a importância de considerar a relação entre a componente principal e às difusas do sinal e os efeitos de multipercurso e sombreamento na capacidade do canal. Com isso, por meio dos estudos realizados espera-se contribuir para o desenvolvimento de redes com HAPs na região de Brasília DF.

REFERÊNCIAS

- Iskandar, Dimas Rinarso Putro, "Performance Evaluation of Broadband WiMAX Services over High Altitude Platforms (HAPs) Communication Channel", 2008, The Fourth International Conference on Wireless and Mobile Communications.
- [2] Fabio Dovis, Roberto Fantini, Marina Mondin, and Patrizia Savi, "Small-Scale Fading for High-Altitude Platform (HAP) Propagation Channels", 2002, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 3, April 2002.
- [3] Projeto Aquila, The Guardian, Abril 2017 [Online]. Disponível em https://www.theguardian.com/business/2016/jul/21/facebook-solarpowered-internet-plane-test-flight-aquila
- [4] Projeto Loon, Google, Abril 2017 [Online]. Disponível em https://plus.google.com /+ProjectLoon
- [5] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space Telecommunication system," Rec. ITU-R P.618-12, 2015.
- [6] ITU-R, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods."Rec. ITU-R P.838-3, 2005.
- [7] ITU-R, "Rain height model for prediction methods." Rec. ITU-R P.839-4, 2013.
- [8] ITU-R, "Characteristics of precipitation for propagation modeling." Rec. ITU-R P.837-6, 2012.
- [9] ITU-R, "Attenuation due to clouds and fog." Rec. ITU-R P.840-6, 2013.
- [10] ITU-R, "Attenuation by atmospheric gases." Rec. ITU-R P.676-11, 2016.
- [11] Celia García-Corrales, Francisco J. Cañete, and José F. Paris, "Capacity of κ-μ Shadowed Fading Channels", 2014, International Journal of Antennas and Propagation, Hindawi Publishing Corporation, Volume 2014, Article ID 975109, 8 pages.
- [12] Masayuki Oodo, Ryu Miura, Teruhisa Hori, Takayuki Morisaki, Kanshiro Kashiki and Mikio Suzuki, "Sharing and Compatibility Study between Fixed Service Using High Altitude Platform Stations (HAPS) and Other Services in the 31/28 GHz Bands", 2002, Wireless Personal Communications 23: 3–14, Kluwer Academic Publishers.