

SISTEMA DE MEDIÇÃO DA ATENUAÇÃO DEVIDO À CHUVA EM ENLACES DE SATÉLITES NA BANDA KU

Glauber Paz Miranda e Gilberto Arantes Carrijo

Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia-MG, Brasil, glauber@cba.inpe.br, gilberto@ufu.br

Resumo—A chuva é a maior causadora das atenuações sofridas por um sinal de RF em enlaces de satélites acima de 10 GHz, impondo ao projeto a reserva de uma margem que acarreta em aumentos de potência, uso de antenas maiores ou de técnicas complexas de correção de erros. Este artigo descreve o projeto, montagem e operacionalização de um sistema de recepção nas bandas Ku/Ka para medir, datar e armazenar o valor instantâneo dessa atenuação e precipitação, visando à construção de um banco de dados, que permita estudar e comparar os dados obtidos à luz dos modelos teóricos utilizados nos projetos.

Palavras-Chave—Atenuação, Chuva, Satélite, banda Ku/Ka, antenas

DESIGN OF A SYSTEM FOR MEASURING THE ATTENUATION DUE RAIN IN KU BAND SATELLITE LINKS

Abstract—Rain is the leading cause of attenuation suffered by an RF signal in satellite links above 10 GHz, requiring to reserve a room in the project which leads to increases in power, use of larger antennas or in the use of complex techniques of error correction. This article describes the design, installation and operation of a receiving system in the bands Ku to measure, date and store the instantaneous value of attenuation and rainfall, in order to build a database, which allows to study and compare the data obtained at the light of the theoretical models used in the projects.

Keywords—Attenuation, Rain, Satellite, Ku/Ka Band, antenna.

I. INTRODUÇÃO

A faixa de frequência do espectro reservada aos satélites de comunicação geoestacionários é limitada, e pode teoricamente ocupar uma faixa que vai de 30 MHz até aproximadamente 40 GHz. Abaixo e acima dessa faixa as ondas eletromagnéticas sofrem degradações severas ao cruzar a atmosfera, tornando o seu uso mais difícil e menos viável. Entretanto, dada a necessidade de compartilhamento do espectro com outros serviços terrestres e aliada a baixa disponibilidade de largura de banda nas faixas menores, foi padronizado mediante acordos na União Internacional de Telecomunicações - setor de Radiocomunicações (ITU-R) algumas sub-faixas dentro da faixa de 1 a 40 GHz para uso pelos satélites de comunicação geoestacionários. Essas sub-faixas, devido à nomenclatura herdada pela área de radares, ficaram conhecidas como banda C (4/6 GHz), Banda Ku (12/14 GHz) e banda Ka (18/24 GHz).

Dentro da faixa de 1 a 40 GHz, é na troposfera - uma das camadas da atmosfera, onde ocorrem as degradações mais significativas, que podem ser classificadas em dois tipos: aquelas resultantes da absorção de alguns dos gases constituintes da sua estrutura (oxigênio e vapor d'água) e aquelas devido as condições adversas do tempo no seu interior ou da presença de hidrometeoros (nuvens, chuva, neve, granizo e nevoeiro). Essas degradações aparecem na forma de atenuação no sinal, despolarização da onda, aumento do ruído térmico, cintilação e desvanecimento.

Os novos tipos de serviços de comunicações atuais demandam maiores taxa de dados, e isso leva como consequência direta, a aumentos na largura de banda utilizada. Como as faixas mais altas de frequências alocadas no ITU-R possuem maior disponibilidade de largura espectral, os satélites estão deslocando suas frequências de operação da banda C para a banda Ku e mais recentemente para a banda Ka [1].

Para a faixa acima de 10 GHz, as degradações realmente significativas são as atenuações causadas por nuvens e chuvas [2]. Entretanto, para o valor de atenuação excedida de 0.01% que geralmente é usado nos projetos de rádio-enlace, e dada a posição geográfica do Brasil, onde os principais satélites de comunicações operam com antenas apontadas com ângulos de elevação acima de 50°, a chuva é a única causadora de atenuação, que cresce proporcionalmente com o aumento da taxa de precipitação.

O Brasil, um país de grande extensão territorial e cujo ritmo atual de desenvolvimento é acelerado, tem aumentado a demanda por serviços de satélites. As chuvas predominantemente caracterizadas pelas altas taxas de precipitação, com células pequenas e de curto tempo de duração, requer intervalos de medida mais curtos dos que estão disponíveis nos atuais centros de meteorologia.

Dado esse cenário no Brasil, de ritmo crescente da demanda por serviços de satélites, da necessidade de uso de faixas de frequências superiores e da existência de chuvas peculiares aliada a escassez de dados que as representem adequadamente, justificam o estudo aqui apresentado. O conhecimento preciso da estatística da atenuação excedida possibilita definir a margem mais adequada nos projetos de enlace, que minimize os custos para uma dada disponibilidade.

A proposta desse artigo é descrever o projeto, a montagem e a operacionalização de um sistema capaz de medir a atenuação de um sinal de RF e a taxa de precipitação instantânea no solo em intervalos de 1 minuto, visando a construção de um banco de dados de longo prazo que permita a elaboração experimental da Distribuição de Probabilidade Acumulada (FDA) da porcentagem temporal desses dois parâmetros, que são necessários para o cálculo de previsão da atenuação excedida. Vários estudos demonstraram que o período requerido para tal elaboração, pode variar entre três a sete anos, dependendo das



X CEEL - ISSN 2178-8308
24 a 28 de setembro de 2012
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

características da região de estudo [2].

Para seu propósito, o sistema é composto por dispositivos apropriados para a aquisição e medição da atenuação sofrida pelo sinal de RF, dispositivos para a medição da taxa de precipitação instantânea, relógio GPS para datação, além de dispor de um sistema de controle de operação, aquisição e armazenamento dos dados. O sistema foi projetado para atender as especificações básicas listadas na tabela I e concebido de forma a permitir a recepção também na banda Ka com a simples troca do alimentador. Por enquanto não há satélites transmitindo na banda Ka e operando no Brasil.

TABELA I
ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS

Descrição	Especificação
1. Faixa de Frequência	10.95-12.2GHz
2. Margem de atenuação máxima	25 dB
3. Resolução do nível de sinal	0.2 dB
4. Resolução da taxa de chuva	0.2 mm/h
5. Precisão do nível de sinal	0.2 dB
6. Precisão da taxa de chuva	0.4 mm/h
7. Precisão angular da antena	0.4 graus
8. Precisão de datação	< 1 seg.

A. Atenuação devido à chuva

A atenuação devido à chuva ocorre devido a três mecanismos principais:

- 1) Absorção e espalhamento da energia da onda incidente provocada pela gotas de chuva.
- 2) Deformidade na estrutura da gota de chuva, que ao adquirir um aspecto achatado na sua queda, causa uma despolarização da onda, tendo como resultado prático uma atenuação no nível de sinal recebido, considerando os sistemas típicos de recepção (de polarização linear) sem dispositivos de compensação desse efeito.
- 3) Desfocalização da onda refletida no refletor parabólico causada pela água que escorre na superfície. A onda refletida, por não mais se concentrar totalmente no foco, onde se localiza o alimentador, resulta em atenuação do sinal recebido.

O sistema proposto nesse experimento mede a atenuação total do sinal de RF devido a todos esses mecanismos citados, e não tão somente a atenuação causada pela chuva no trajeto até a antena. Como qualquer sistema de recepção está sujeito aos mesmos mecanismos, a atenuação total medida é uma aproximação mais real do que ocorre na prática.

Devido à natureza aleatória e imprevisível do fenômeno da chuva que ocorre todos os anos, a previsão tanto da precipitação quanto da atenuação específica (dB/Km) é feita através de métodos de previsão estatísticos. Esses métodos podem ser empíricos e baseados em medidas da precipitação superficial ou da atenuação feitos por experimentos dentro de uma dada região geográfica, ou podem ser baseados em métodos físicos através de modelos matemáticos que tentam reproduzir o comportamento físico que envolve o processo de atenuação [8]. Como no método físico nem sempre todos os parâmetros são conhecidos e disponíveis, os métodos de base empírica são os mais utilizados.

A figura 1 ilustra a geometria envolvida num enlace via satélite sob a ocorrência de precipitação. Onde a altura média da chuva definida pela camada isotérmica de $0^{\circ}C$ e que

provoca a atenuação é definida por h_R , a altura de instalação da antena é dada por h_S , o trajeto percorrido pelo sinal sob o efeito da chuva é dado por L_S e sua projeção horizontal definida por L_G .

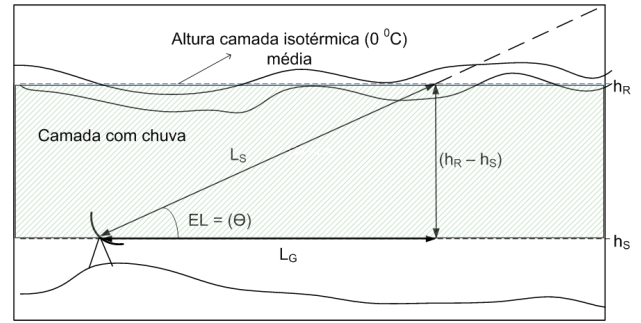


Fig. 1. Geometria da instalação

Dentre os vários métodos disponíveis, o mais utilizado e representativo de todos eles, é o recomendado pelo ITU-R (recomendação atual P.618-10), que possui abrangência global e foi desenvolvido através de extensivas medições da taxa de precipitação pontual e da atenuação no trajeto do sinal, obtidas ao longo de vários anos em muitos países. No modelo do ITU-R os parâmetros de entrada são: A taxa de precipitação com tempo de integração de 1 minuto, a altura geométrica da antena receptora, o ângulo de elevação da antena, a latitude geodésica, a frequência de operação e por último o raio efetivo da terra.

Através desses dados e de outras fórmulas disponíveis na recomendação ITU-R P.839-3, obtém-se o valor da altura média da camada de formação da chuva (altura isotérmica de 0°), uma vez que esta é dependente da latitude da antena e da temperatura. Locais que apresentam grande variação de temperatura diária e ao longo do ano, exibem também variação na altura isotérmica e conseqüentemente do trajeto percorrido pelo sinal. Essa altura medida através de vários experimentos é disponibilizada no sítio eletrônico do ITU-R, com uma resolução de 1.5° no arquivo *ESA0HEIGHT.TXT*.

O comprimento do trajeto percorrido pelo sinal (L_S slant-path length) sob o efeito da chuva, e para ângulos de elevação $\theta \geq 5^{\circ}$, é dado por:

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta} \quad (1)$$

A projeção horizontal, L_G , do comprimento do trajeto é dado por:

$$L_G = L_S \cos \theta \quad (2)$$

O passo seguinte é o cálculo da atenuação específica (γ_R) em dB/Km. A atenuação específica depende da taxa de precipitação excedida em 0.01% do tempo, que se não disponível através de medidas feitas no local, pode ser extraída dos mapas ou tabelas disponíveis na recomendação ITU-R P.837. Encontrado o valor de $R_{0.01\%}$, a atenuação específica pode ser calculada através de:

$$\gamma_R = K(R_{0.01})^{\alpha} \quad (3)$$

Onde K e α são parâmetros dependentes da frequência, da distribuição do tamanho da gotas, da temperatura da chuva, da polarização e do ângulo de inclinação relativo ao horizontal. Na recomendação ITU-R P.838-3 encontra-se a metodologia e

fórmulas para o cálculo de K e α bem como valores tabelados para diversas frequências e polarizações.

Como a chuva não pode ser considerada homogênea ao longo dos percursos horizontal e vertical, insere-se o conceito de comprimento efetivo do trajeto (L_E), que visa descrever um comprimento de trajeto médio através de uma chuva hipoteticamente uniforme e com a mesma taxa de precipitação da que foi medida em um determinado ponto da superfície. O comprimento efetivo (L_E) deriva do comprimento do trajeto L_s e de fatores de ajustes vertical e horizontal. Esses fatores de ajustes são dependentes da frequência, da latitude e do ângulo de elevação e são determinados através de fórmulas encontradas na recomendação ITU-R P.618-10.

Finalmente calcula-se a atenuação média excedida para 0.01% do tempo através de:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad (4)$$

A atenuação excedida para outros valores percentuais são calculados tendo como base a taxa para 0.01%. Para valores percentuais entre 0.01% e 5% utiliza-se a fórmula a seguir:

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^Y \quad (5)$$

Sendo que o valor de Y é dado por:

$$(-0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(-1 - p) \sin \theta)$$

Os valores de β , que dependem da latitude e do ângulo de elevação da antena, são encontrados na recomendação ITU-R P.618-10.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma das técnicas experimentais utilizadas para se verificar a atenuação do sinal de um satélite é através da medição da potência recebida do seu sinal de *beacon*. O sinal de *beacon* é um sinal de RF sem modulação transmitido pela quase totalidade dos satélites de comunicações e usado geralmente para auxiliar o sistema de correção de apontamento da antena ou no controle automático da potência transmitida em terra. Como esse sinal possui uma grande estabilidade, qualquer variação no nível de potência recebido, a partir de um nível de referência, pode seguramente ser associado com a atenuação causada pelas condições ambientais no enlace.

O sistema é constituído basicamente por uma antena e seus dispositivos de RF, receptor, relógio GPS e computador gerenciador das operações. As figuras 2 e 3 mostram respectivamente os diagramas em blocos dos dispositivos instalados na partes externa e interna da edificação.

Os equipamentos foram instalados na cidade de Cuiabá-MT (lat.: -15.5°, long.: -56.15°, alt.: 212 m) na Estação Terrena de Rastreo e Controle do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Após vários testes de verificação de nível de potência e estabilidade de frequência de sinais de Beacon de vários satélites de comunicação geoestacionários, a antena foi permanentemente direcionada para o satélite StarOne-C2, que está posicionado na latitude 70° W. O Star-one C2 transmite dois sinais de *Beacon* nas frequências de 11700.5 GHz com polarização vertical e 12199.3 GHz com polarização horizontal.

Na prática, uma maneira viável de medir a variação na potência do sinal de *beacon* é através da medição e registro do

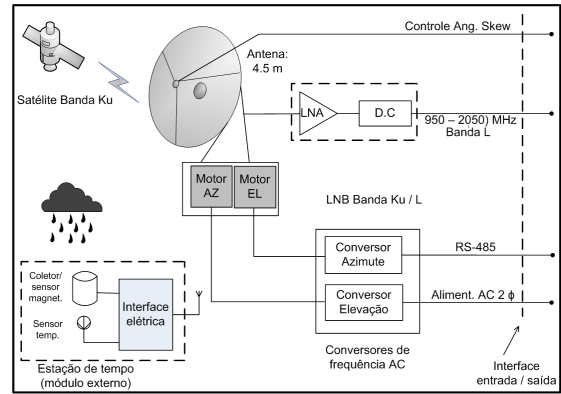


Fig. 2. Diagrama em blocos dos dispositivos instalados da parte externa da edificação.

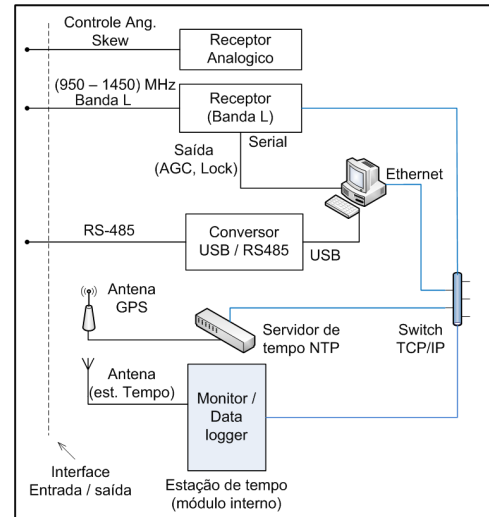


Fig. 3. Diagrama em blocos dos dispositivos instalados da parte interna da edificação.

sinal de Controle Automático de Ganho (AGC), presente na maioria dos receptores. O sinal de AGC é uma tensão contínua (Vdc) gerada internamente no receptor, e que é posteriormente aplicada aos amplificadores de Frequência Intermediária (FI) e aos estágios de RF da entrada, para controlar o ganho desses amplificadores a fim de manter o nível na entrada do demodulador estável. Dessa forma, a tensão de AGC acompanha as variações do sinal, que pode ser medida através da mesma.

Para a recepção do sinal de RF utilizou-se uma antena com refletor parabólico do tipo foco primário de 4,5m de diâmetro, que tem a função de captar e concentrar o sinal no alimentador. O alimentador é capaz de receber sinais na banda Ku com polarização linear vertical ou horizontal (V/H) e ajuste do ângulo de inclinação (*Skew*) comandado por um outro receptor analógico. A figura 4 mostra a antena e a cabine abrigada, onde estão alojados os módulos conversores de frequência que acionam os motores AC e os circuitos elétricos de proteção e interrupção.

O sinal de saída do alimentador é direcionado ao dispositivo amplificador de baixo ruído associado ao conversor descendente de frequência (LNB - *Low Noise Amplifier*). Após o LNB, o sinal de entrada na banda Ku é transladado para a banda L (950 - 1450 MHz) e encaminhado via cabo coaxial diretamente ao receptor de *beacon*.



Fig. 4. Equipamentos externos: Antena com posicionador elétrico e cabine abrigada com conversores de frequência AC.

Os dados de precipitação e temperatura são adquiridos por uma estação meteorológica, composta de uma unidade externa, onde se abrigam os sensores e uma unidade interna que possui um mostrador com interface de comunicação. O sensor de precipitação é do tipo balde basculante (*tipping bucket*) com chaveamento magnético (*reed switch*), que gera um pulso elétrico a cada quantidade acumulada de 0.2 mm de chuva.

A monitoração da tensão DC do sinal de AGC, que no receptor utilizado já a fornece digitalizada, é feita através de uma interface serial RS-232 conectada a outra interface do mesmo tipo no PC gerenciador.

O computador PC gerenciador roda dois programas: um deles desenvolvido em linguagem Delphi, que tem a função de leitura, datação e armazenamento da tensão de AGC, da precipitação e temperatura; Outro, desenvolvido em linguagem Matlab realiza o pós-processamento dessas medidas e extrai o valor da atenuação presente no sinal.

III. SISTEMA DE RF

A análise e cálculo do enlace satélite-estação terrena é bastante simplificada, sendo voltada apenas para definir o nível de potência mínimo na entrada do receptor de *beacon* que esteja dentro da faixa dinâmica de atuação do AGC, para os níveis de atenuação esperados. O objetivo final é o de obter uma margem maior que 25 dB do valor mínimo requerido, que é o valor máximo de atenuação esperado do sinal em banda Ku, para os níveis de taxa de chuva encontrados na localidade de Cuiabá-MT.

De posse desse valor de potência mínimo requerido, dos parâmetros de transmissão do satélite (EIRP do sinal de beacon), do mapa de contorno da distribuição de potência (*footprint*), das especificações do LNB e cabos usados, estimam-se os parâmetros da antena, tais como, tamanho, eficiência, tipo e figura de mérito. Os parâmetros básicos necessários para o cálculo do enlace encontram-se na tabela II.

A partir dessas especificações básicas, realizam-se os cálculos de enlace, cujas fórmulas e resultados são apresentados na tabela III. Verifica-se por intermédio dessa tabela que uma antena de 4,5 m com uma eficiência ρ igual a 0.6 atende aos requisitos iniciais, uma vez que a margem calculada foi igual a 27,5 dB para as condições de tempo bom, e no pior cenário com chuva, ainda sobraría uma margem de 2,5 dB. Os mesmos cálculos para uma antena de 1m mostram que esse

TABELA II
ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS PARA O PROJETO DE RF

Enlace de descida	
Dados	Satélites
Satélite	Starone C2
Data de lançamento	abr/08
EIRP (dBW): Satélite	8
F: Frequência (GHz)	12
K : constante de Boltzman	1.38E-23
B (KHz): Largura de banda	0.5
Le (graus norte) : lat. ET	-15.555
le (graus oeste) : long. ET	56.07
ls (graus oeste) : long. Sat.	70
d (m): Diâmetro da antena	4.5
η : eficiência da antena	0.6
L (dB) : alim., Guias	0.5
Glnb (dB): Ganho do LNB	60
NF(dB): Fig. ruído do LNB	0.8
C1 (m) : Comp. cabo banda L	30
Ae (dB/m) = At. cabo banda L	0.25
At2 (dB) : Atenuação diversa	0
Atchuva (dB) : At. chuva: Cuiabá	25

tamanho seria insuficiente, já que a margem encontrada seria de apenas 14.5 dB com tempo bom, e em caso de chuvas estaria cerca de 10 dB abaixo do nível mínimo necessário.

TABELA III
PLANILHA COM CÁLCULO DE ENLACE

Cálculos	
Parâmetro	Valor
$\lambda(m) = 3 \times 10^8 / F$	0.03
$\cos(\gamma) = \cos(Le) \cos(ls - le)$	0.94
$(\gamma) = \sqrt{1 - (\cos(\gamma))^2}$	0.35
$D = 42242 \sqrt{1.023 - 0.3016(\cos(Le) \cos(ls - le))}$	36355.99
$s = 0.5(a + c + \gamma)$	25.13
$El = \arccos(\gamma / \sqrt{1.023 - 0.3016(\cos(\gamma))})$	65.67
$AZ = 360 - [2 \arctan[\sqrt{\frac{(sen(s-\gamma)(s-Le))}{(s)(ls-le)}}]]$	317.23
$A_e(dB) = 10 \log[(4\pi D/\lambda)^2]$	205.24
$G_{ar}(dB) = 10 \log[(4\rho((\pi d/2)/\lambda)^2] - L$	52.33
$T_{atm}(k^o) = 30 + (100/El) + (300/El^2)$	31.55
$T_{lnb}(k^o) = 290[10^{(NF/10)} - 1]$	58.66
$T_s(k^o) = \frac{(T_{atm} + 2.7)/(10^{L/10}) + 290(10^{(L/10)} - 1)/(10^{(NF/10)})}{1}$	120.72
$A_{t1}(dB) = (Ae) \times C1$	7.50
$Gt(dB) = (Gar + Glnb - At1 - At2)$	104.83
$Pr_{max}(dBm) = (EIRP + 30 - Ae + Gt)$	-62.41
$Pr_{min}(dBm) = (EIRP + 30 - Ae - A_{chuva} + Gt)$	-87.41
Nível mínimo ent. Receptor (dBm)	-90.00
Margem tempo seco (dB)	27.59
Margem com chuva pior caso (dB)	2.59
$G/T (dB/K) = G_{ar}(dB) - T_s (dBK)$	31.51
$C/N (dB) = EIRP - Ae - K (dB) - B + G/T$	35.89
$C/N_0(dB) = EIRP - Ae - K(dB) + G/T$	62.88

IV. SISTEMA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

O sistema de aquisição e Processamento é responsável pela aquisição, datação, pós-processamento e armazenamento dos dados. Para a realização dessas tarefas, o sistema se utiliza do receptor, da estação Meteorológica, do relógio gerador de padrão de tempo (GPS), de um Computador Pessoal (PC) rodando sistema operacional Windows XP e de um programa específico. O objetivo final é gravar num arquivo de texto as seguintes informações sincronizadas: data, tempo, tensão de AGC, precipitação, temperatura, estado de trava (*Lock*) do receptor, frequência sintonizada e valor do atenuador do receptor.

Todas essas informações são coletadas pelas respectivas interfaces de comunicação no PC a uma taxa fixa de 1 mensagem por segundo, gerenciadas através do programa central de processamento.

V. PÓS-PROCESSAMENTO

Na prática a órbita de um satélite de comunicação não é completamente estacionária em relação a um ponto na terra. Forças adicionais que atuam no satélite provocam alterações no formato da sua órbita (excentricidade), na orientação do seu plano orbital (inclinação), na longitude do ponto subsatélite e na orientação do seu plano orbital [5]. Do ponto de vista da antena, essas diversas oscilações no movimento do satélite são sentidas como variações nos ângulos das coordenadas de azimute e elevação, que de outro modo seriam estáveis.

Em condições ideais em dia de céu claro, o valor da tensão de AGC após um apontamento inicial deveria se manter constante, e este seria o valor de referência para o cálculo da atenuação. Como isso não ocorre na prática, o valor de referência é estipulado como o resultado da média horária entre os níveis de AGC observado nos dias anteriores e posteriores ao dia efetivo das medidas. Experiências similares, descritas em [6] e [7] utilizaram-se dessa mesma estratégia.

A figura 5 ilustra o comportamento da variação da margem em dB, da temperatura, e os erros dos apontamentos angulares (AZ, EL) para o dia 05 de fevereiro de 2012, computados usando o programa comercial STK (*Satellite Tool Kit*). Perfis similares de comportamento foram observados em todos os dias analisados. A margem é o resultado da tensão de AGC

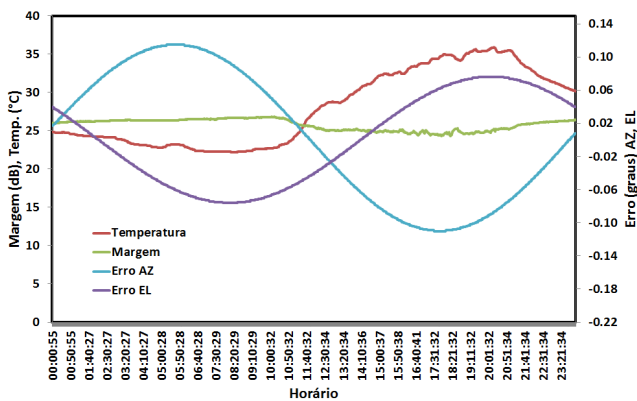


Fig. 5. Ilustração do sinal recebido associada à temperatura variações em AZ e EL

convertido em dB, e depois somada ao atenuador de entrada do receptor. Nota-se que a margem permanece com pouca variação entre 18:30 e 06:30 (horário local) com valor médio de cerca de 27.86 dB e amplitude de variação por volta de 0.5 dB, e fora desse período, coincidindo com o intervalo durante o dia, sofre uma diminuição de aproximadamente 1.7 dB. As amplitudes de variação nos eixos de AZ e EL são bastante similares, atingindo valores na ordem de 0.15° em EL e 0.20° em AZ. Considerando que a largura de feixe de meia potência nominal da antena para a frequência de 12 GHz é da ordem de 0.4° , a variação angular nos dois eixos poderia levar a uma variação no nível de sinal recebido de até 3 dB.

A figura 6 ilustra a variação do sinal recebido em dB junto com a temperatura num período de 22 dias corridos. Percebe-

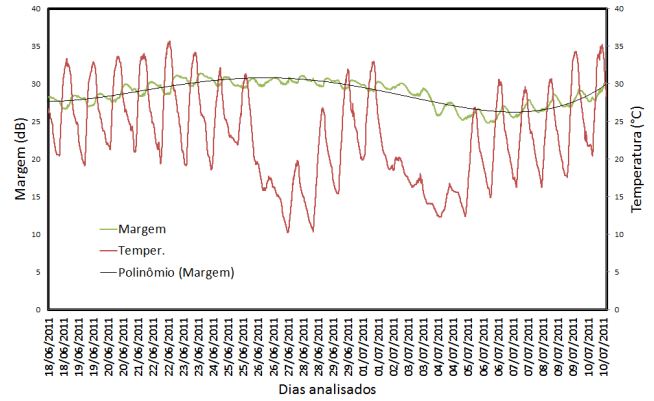


Fig. 6. Margem e Temperatura céu claro entre 18/06 a 10/07/2011

se a variação diária e outra variação de período maior, que para esse ciclo analisado apresentou uma periodicidade de aproximadamente 20 dias. A amplitude de variação do sinal recebido nesse período foi igual a 6.67 dB e valor médio igual a 28.77 dB. Desta forma, o uso do valor médio como valor de referência para o cálculo da atenuação final, poderia levar a um erro por volta de 3dB para os dias em que o nível recebido se encontra mais afastado da média. Quando se considera os níveis obtidos nos dias anteriores e posteriores, o erro fica por volta de 0.8 dB.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O comportamento típico da atenuação obtida durante um dia de ocorrência de chuva após o pós-processamento está ilustrado no gráfico da figura 7. A atenuação medida fica próxima

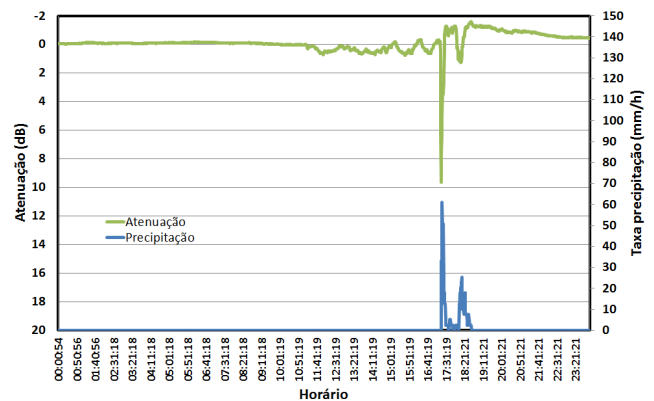


Fig. 7. Atenuação e precipitação medida no dia 30/01/2012

de zero, como esperado, até o momento em que começa uma pequena oscilação por volta de 10:45:00 GMT sem ainda qualquer registro de ocorrência de chuva, que só começa a ocorrer por volta de 17:17:00 GMT. Essa oscilação coincide com o período diário onde há uma elevação de temperatura e consequente oscilação da tensão de AGC medida, coerente com o ocorrido em outros dias. Durante o evento da chuva, verifica-se uma completa correlação entre a chuva e atenuação medida, com uma pequena defasagem entre eles. Nota-se ainda que após a chuva, o nível da atenuação não volta para os valores medidos de antes do evento. Esse efeito é devido à diminuição da temperatura que sempre ocorre após a chuva,

e que por sua vez, provoca um aumento do ganho do LNB, aumentando o nível de recepção medido.

A figura 8 mostra o comportamento da atenuação e da taxa de precipitação observados durante 14 dias com chuva em Cuiabá. Observa-se que na maioria dos trechos há uma boa correlação entre as duas variáveis e atenuação máxima atingida em torno de 14 dB quando a taxa de precipitação foi superior a 160 mm/h. Em alguns trechos em que a atenuação foi mais elevada em relação ao que se poderia esperar para a taxa de precipitação medida, leva a sugerir que a utilização de apenas um pluviômetro, como o utilizado nessa experiência, é insuficiente para estabelecer uma correlação direta entre essas duas variáveis.

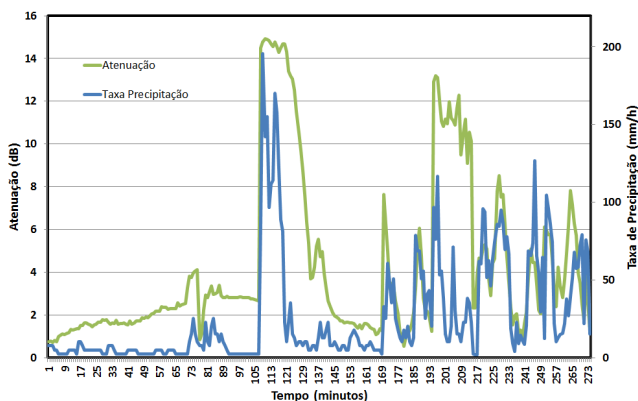


Fig. 8. Comportamento da Atenuação em função da Taxa de precipitação de todos os eventos de chuva ocorridos entre 10/06/2011 a 27/02/2011

VII. CONCLUSÃO

Durante o estudo observou-se que o modelo proposto da estação com seus componentes atendem e são necessários para a efetiva medição da atenuação do sinal. A capacidade de medição da atenuação (margem) é da ordem de 27 dB com erro de medida menor que 1 dB. O erro máximo encontrado na datação dos eventos foi de 300 ms, ficando abaixo da especificação estipulada no estudo.

A operação do sistema se mostrou estável, com poucas falhas no período inicial, que após sanadas passou a operar ininterruptamente durante o período de coleta de dados (06 meses). Nesse período, a atenuação máxima observada foi por volta de 15 dB e a taxa de precipitação máxima registrada por volta de 180 mm/h.

A estratégia de usar como referência para o cálculo da atenuação os valores de níveis de sinal medidos nos dias anteriores e posteriores ao evento, mostrou-se essencial para se obter um erro menor que 1 dB, visto que a variação média do sinal recebido após alguns dias e sem chuva pode chegar a atingir cerca de 3 dB.

Acredita-se que a estação, devido aos ajustes realizados durante o estudo, atenderá ao objetivo proposto de coleta de dados de longo prazo, visando a construção de um banco de dados que possa servir para estudos futuros, que permita analisar os dados obtidos à luz dos modelos teóricos utilizados.

REFERÊNCIAS

- [1] MILLER, P. Ka band - the future of satellite communication? *TELE-satellite & Broadband*, v. 1, n. 9, p. 12–14, August 2007.
- [2] CRANE, R. K. Prediction of attenuation by rain. *IEEE Translation on communications*, COM-28, n. 9, p. 1717–1733, September 1980.
- [3] IPPOLITO, L. J. *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. first. [S.l.]: Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-72527-6.
- [4] ITU-R. *Rec. ITU-R P.837-5. Characteristics of precipitation for propagation modelling*. [S.l.], agosto 2007. [Online; acessado em 22-dezembro-2011].
- [5] SOOP, E. M. Introduction to geostationary orbits. *European Space Agency - ESA*, November 1983.
- [6] MAEKAWA, Y. et al. Effects of tropical rainfall to the ku-band satellite communications links at the equatorial atmosphere radar observatory. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 84A, p. 211–226, March 2006.
- [7] MANDEEP, J. S. Equatorial rainfall measurement on ku-band satellite communication downlink. *Progress In Eletromagnetics Research*, p. 195–200, 2007.
- [8] OJO, J. S. and Ajewole M. O. and Sarkar S.K. Rain Rate and Rain Attenuation Prediction for Satellite Communication in Ku and Ka bands over Nigeria. *Progress In Eletromagnetics Research*, Vol 5, p. 207–223, 2008.