

4

Resultados Experimentais

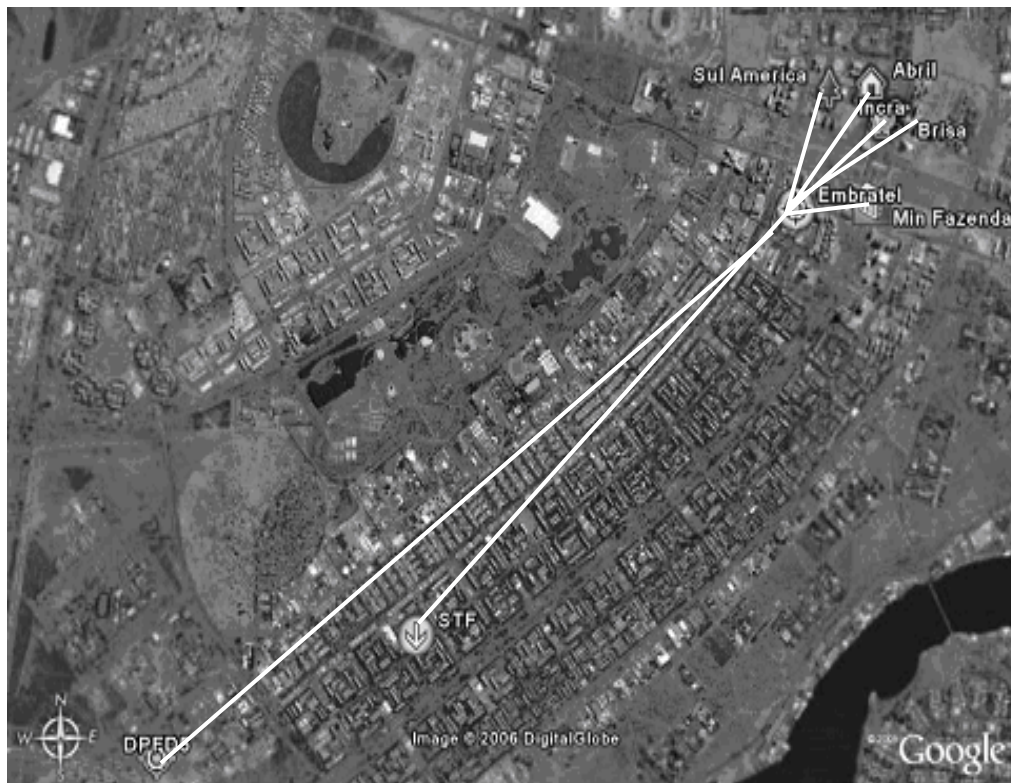
Os modelos de previsão descritos no capítulo anterior são empíricos e baseados em dados medidos, predominantemente, em regiões de clima temperado, não apresentando bom desempenho em regiões de clima tropical e equatorial [20;27;29-32;71-75]. No presente trabalho foram realizadas medições de atenuação por chuvas em enlaces terrestres, em regiões de clima tropical para, em conjunto com dados de medidas anteriores realizadas no Brasil, e ainda não incluídas no banco de dados do UIT-R, fornecer uma base ao desenvolvimento de métodos empíricos mais precisos.

Após análise de viabilidade técnica e disponibilidade de sistemas de telecomunicações para realização das medidas, foram escolhidos enlaces em Brasília e no Rio de Janeiro.

Em Brasília as medições foram realizadas em 11 (onze) enlaces da Embratel com comprimentos variando de 0,93 a 10,73 km. Destes enlaces, um opera na frequência de 15 GHz, 5 na frequência de 23 GHz e outros 5 na de 38 GHz. O ponto de convergência dos enlaces possui as coordenadas 15 S 47' 46,2'' de latitude e 47 W 53' 20,2'' de longitude. Os parâmetros dos 11 (onze) enlaces de Brasília, incluindo a duração do experimento, aparecem na tabela 13. Para alguns enlaces as medições foram realizadas durante períodos distintos de um ano, enquanto que, em outros, foi possível medir continuamente por dois anos, como indicado na tabela. Na Figura 12 observa-se a distribuição geográfica esquemática dos enlaces convergentes na estação Embratel – Brasília (BSA), para cada período de medição.

Tabela 7 – Dados dos enlaces terrestres convergentes de Brasília

Enlace	Comprimento (km)	Frequência (GHz)	Polarização	Duração
BSA – ABRIL	1,12	38	Horizontal	1 ano
BSA – MF	1,21	38	Vertical	2 anos
BSA – DPF05	6,73	23	Vertical	2 anos
BSA – INCRA	1,21	23	Horizontal	1 ano
BSA – AMÉRICA	0,93	38	Vertical	1 ano
BSA – STF	4,48	23	Vertical	2 anos
BSA – BRISA	1,09	38	Horizontal	1 ano
BSA – CASSI	0,76	23	Vertical	1 ano
BSA – CERES	2,15	38	Vertical	1 ano
BSA – ESAF	10,53	15	Vertical	1 ano
BSA – BRA	3,78	23	Vertical	1 ano



(a)



(b)

Figura 8 – Distribuição geográfica dos enlaces convergentes de Brasília: (a) primeiro ano de medições; (b) segundo ano de medições.

As medidas realizadas no Rio de Janeiro utilizaram-se de alguns enlaces da Rede do Exército, tendo como ponto de convergência o Palácio Duque de Caxias (PDC), antiga sede do Ministério do Exército. Foram escolhidos 4 (quatro) enlaces para serem avaliados, cujos parâmetros e distribuição geográfica são apresentados, respectivamente, na tabela 8 e figura 9.

Tabela 8 – Dados dos enlaces terrestres convergentes do Rio de Janeiro

Enlace	Comprimento (km)	Frequência (GHz)	Polarização	Duração
PDC – IME (Praia Vermelha)	5,60	15,0	Vertical	2 anos
PDC – ESG (Urca)	5,20	18,0	Horizontal	2 anos
PDC – SUMARÉ	5,10	23,0	Vertical	2 anos
PDC – VMI (Deodoro)	22,0	8,0	Horizontal	2 anos

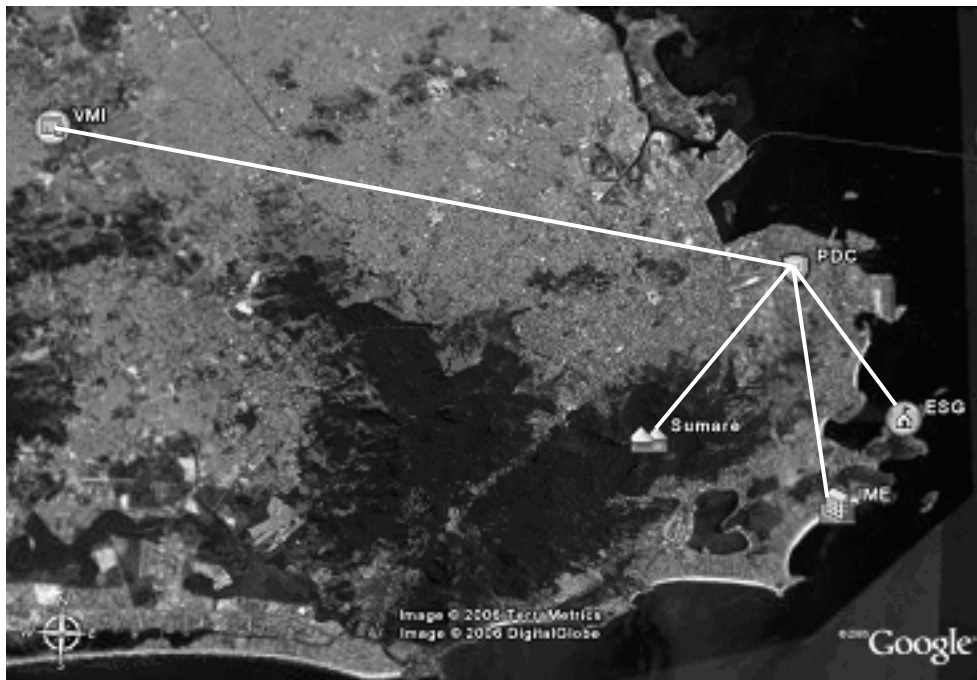


Figura 9 – Distribuição geográfica dos 4 (quatro) enlaces convergentes do Rio de Janeiro

4.1

Descrição do Experimento

O set-up experimental, utilizado para os sítios de medida de Brasília e Rio de Janeiro, consiste de: equipamentos rádio analógicos modelo NEC PASOLINK para os enlaces de Brasília; rádio digitais modelos Minilink C e E da marca Ericsson e Minilink da marca Harris para os enlaces do Rio de Janeiro; um pluviômetro de caçamba basculante e uma unidade de aquisição de dados (UAD) em cada local. A figura 10 ilustra a configuração dos sistemas de medida.

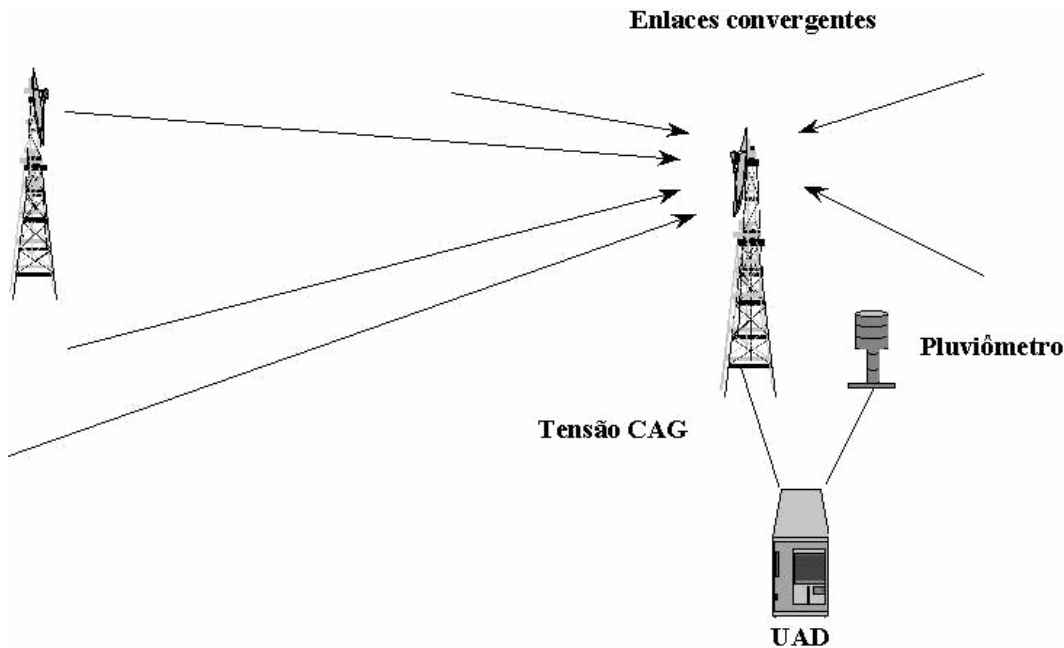


Figura 10 – *Set-up* experimental das medidas da atenuação por chuvas nos enlaces convergentes de Brasília e Rio de Janeiro

O pluviômetro de caçamba basculante tem uma área de coleta de 800 cm^2 e um volume da caçamba de 8 ml , que corresponde a uma altura de chuva de $0,1 \text{ mm}$. Cada vez que se coleta um volume de chuva 800 cm^3 a caçamba muda de posição, o que aciona um relé, gerando um pulso de tensão. A taxa de precipitação média durante cada intervalo entre pulsos é obtida dividindo-se $0,1 \text{ mm}$ pela duração do intervalo.

A UAD é um microcomputador dedicado [70], que permite o registro de tensões analógicas, como as de controle automático de ganho de receptores (tensão de CAG), e de sinais pulsados, como os de pluviômetros. Como ilustrado na figura 11, a UAD é dividida em dois sub-sistemas. O primeiro (dentro da área limitada pela linha tracejada) faz a seleção seqüencial do canal, a adequação do nível de tensão de cada canal à faixa de níveis de entrada do microcontrolador, e a conformação da informação paralela para uma forma serial, mais interessante do ponto de vista de comunicação com um computador. O segundo sub-sistema é o responsável pelo registro de dados provenientes dos canais coletados em mídia. A tarefa de gerenciamento dos dados é feita por *software*. De uma forma geral pode-se dizer que há dois *software* envolvidos, um em cada sub-sistema. O *software* do primeiro subsistema é responsável pela seleção síncrona dos canais a serem coletados, controle do nível de atenuação imposto à fase de equalização e o envio

dos dados na forma serial. O segundo *software*, que é implementado em um computador, é responsável pela adequação dos dados seriais provenientes do microcontrolador de aquisição e gravação em mídia.

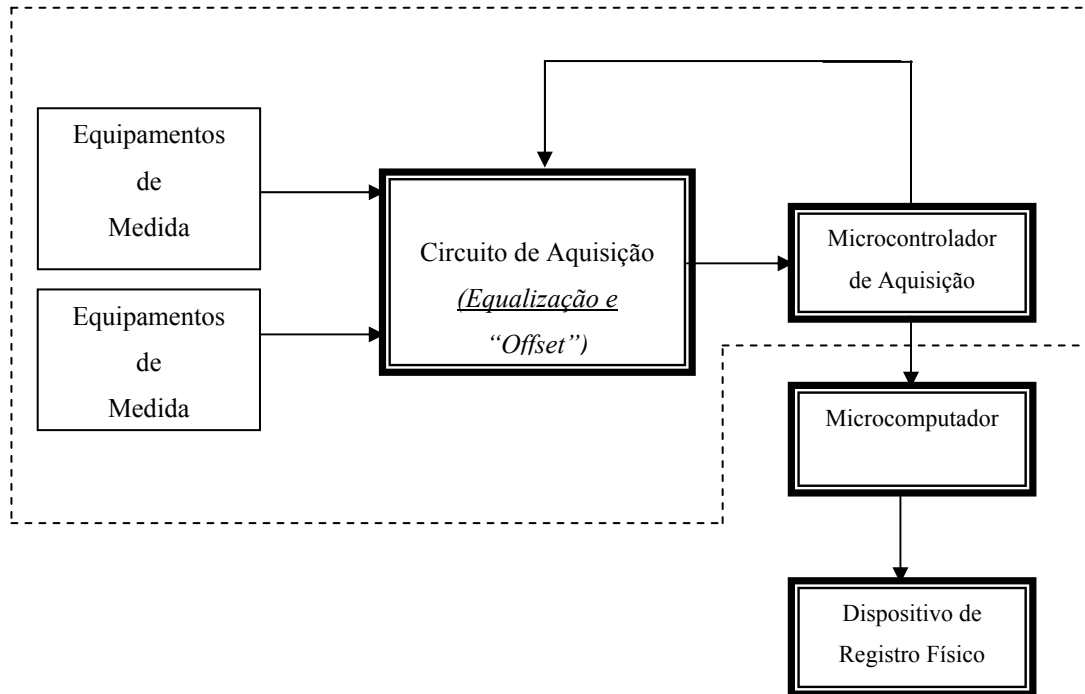


Figura 11 – Esquema básico da UAD

No caso deste experimento os dados analógicos (tensões de CAG) foram amostrados a uma taxa de 1 Hz. Os dados amostrados são armazenados em forma digital. Os dados digitais adquiridos provenientes de pluviômetros são constituídos por seqüências de pulsos gerados de acordo com a velocidade com que há o esvaziamento do recipiente interno responsável pela detecção da vazão de água (volume por unidade de tempo). Taxas máximas de geração de “transição” pelo dispositivo são da ordem de 2 Hz. Os dados armazenados são a data e o tempo (hora, minuto e segundo) de ocorrência de cada pulso de tensão gerado pelo pluviômetro.

Na fase de pré-processamento os dados armazenados (tensões CAG) são convertidos em potência recebida através das curvas de calibração obtidas durante a instalação do equipamento. Essas curvas têm a forma geral de um polinômio de quinto grau, cujos coeficientes variam para cada enlace.

4.2

Pré-processamento de Séries Temporais [62]

Os registros da potência recebida e da taxa de precipitação para cada dia de medida são representados em forma de série temporal, como a mostrada na figura 12 . Estas séries são pré-processadas utilizando o programa TSEDIT (*Time Series Editor*).

O TSEDIT é um programa de pré-processamento que permite a visualização e eventual modificação (edição) de séries temporais armazenadas em arquivos de dados compatíveis com o formato utilizado pelas unidades de aquisição de dados (UADs) produzidas pelo CETUC. A edição de dados é necessária para eliminar períodos de interrupção devido a manutenções rotineiras ou corretivas dos sistemas rádio. No TSEDIT as séries temporais sempre são manipuladas em dias, ou seja, períodos de tempo iniciados a 0 horas e com duração de 24 horas. Assim, qualquer modificação e visualização de amostras devem ser realizadas em um dia de cada vez.

É importante ressaltar que alguns enlaces apresentaram, em raras ocasiões, problemas de saturação em instantes ou períodos de tempo nos quais ocorreram variações muito rápidas do nível do sinal. A UAD registra, de fato, as variações do nível de tensão e não seu valor absoluto, de modo a reduzir o tamanho dos arquivos gerados. O número de níveis de discretização destas variações é limitado, podendo ocorrer saturação quando ocorrem variações muito bruscas. Entretanto, observou-se que esses problemas não ocorreram durante eventos de desvanecimento devido à chuva, sendo devidos apenas às atividades de manutenção já mencionadas, e puderam ser editados sem comprometer a qualidade dos dados. Os *up-times* dos dados utilizados no presente trabalho são muito próximos ou superiores a 90%. Em geral, pode-se dizer que, observando as séries temporais correspondentes ao período total da medida, os dados obtidos são de alta qualidade, prescindindo de qualquer técnica de pré-processamento adicional, como, por exemplo, a filtragem dos dados.

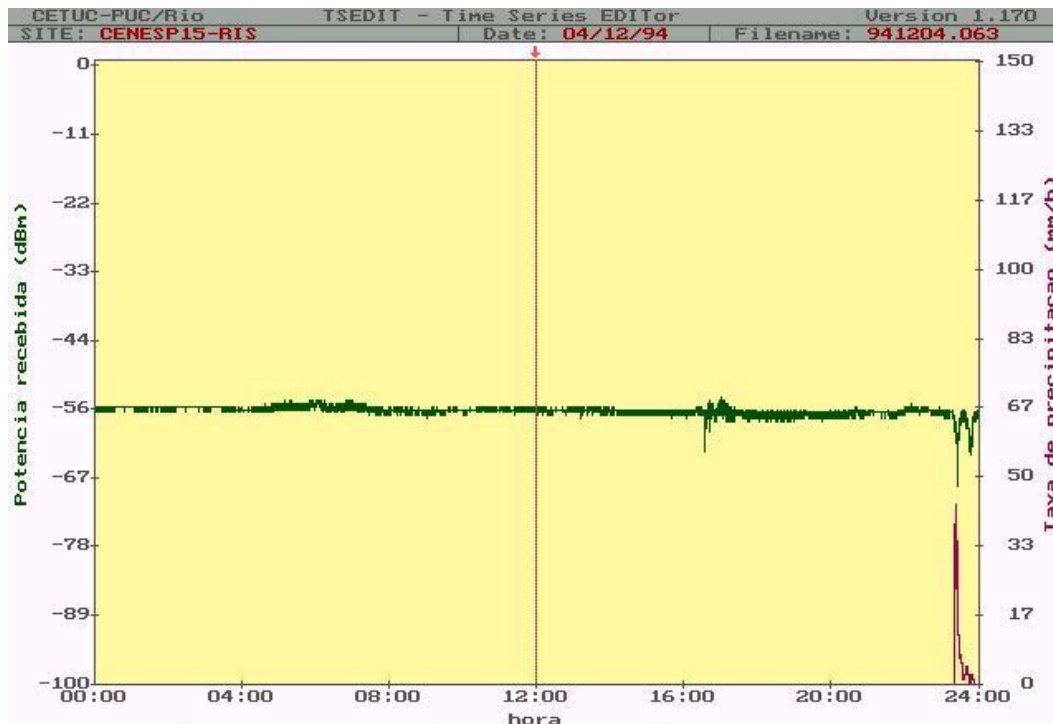


Figura 12 – Série temporal da potência recebida e da taxa de precipitação, gerada pelo programa TSEDIT

As séries temporais permitem determinar os níveis nominais de potência de cada enlace, parâmetro de relevante importância para o cálculo das distribuições cumulativas da atenuação por chuvas, como será visto na seção seguinte.

4.3

Análise de Dados

A análise estatística dos dados realizada neste trabalho consiste na determinação das distribuições cumulativas da taxa de precipitação nos locais de medida, da atenuação por chuvas de cada enlace, da atenuação diferencial por chuvas para cada enlace convergente.

4.3.1

Distribuição Cumulativa da Taxa de Precipitação

A distribuição cumulativa da taxa de precipitação é dada pela fração do tempo total da medição, no período de tempo considerado, em que cada valor de taxa de precipitação é excedido. Portanto, a distribuição cumulativa da taxa de precipitação é dada por:

$$F_R(R) = \frac{\text{Tempo total em que a taxa de precipitação excedeu } R(\text{mm/h})}{\text{Tempo total da medida}} \quad (4.1)$$

onde:

$F_R(R)$ = Distribuição cumulativa da taxa de precipitação.

Nesta análise, $F_R(R)$ é determinada para valores de R maiores que 1 mm/h, em passos de 1 mm/h, até atingir o valor máximo observado.

A série temporal de R utilizada para o cálculo da distribuição cumulativa é obtida a partir dos dados do pluviômetro. Estes dados consistem da data, hora e segundo de cada ocorrência do esvaziamento da caçamba basculante que coleta a água da chuva. A taxa de precipitação média (R) durante um intervalo de tempo (Δt) entre dois esvaziamentos consecutivos é dada por:

$$R(\text{mm/h}) = 3600 \frac{V/A}{\Delta t(\text{seg})} \quad (4.2)$$

onde:

V = Volume da caçamba, em ml.

A = Área de coleta do pluviômetro, em m^2 .

A medida é realizada, portanto, com tempo de integração variável e inversamente proporcional à taxa de precipitação. Com o objetivo de uniformizar o tempo de integração da série, utilizam-se intervalos consecutivos de 1 minuto para obter o valor médio da taxa neste intervalo.

4.3.2

Distribuição Cumulativa da Atenuação por Chuva

A distribuição cumulativa da atenuação por chuvas num enlace é dada por:

$$F_A(A) = 1 - F_{P_R}(P_R) \quad (4.3)$$

onde $F_{P_R}(P_R)$ representa a distribuição cumulativa da potência recebida no enlace, determinada de forma similar ao cálculo da distribuição cumulativa da taxa de precipitação:

$$F_{P_R}(P_R) = \frac{\text{Tempo total em que a taxa de precipitação excedeu } P_R \text{ (mm/h)}}{\text{Tempo total da medida}} \quad (4.4)$$

A relação entre a atenuação (A) e a potência recebida no enlace (P_R) é dada por:

$$P_R(\text{dBm}) = P_{R\text{nom}}(\text{dBm}) - A(\text{dB}) \quad (4.5)$$

A potência recebida nominal ($P_{R\text{nom}}$) é determinada, originalmente, durante a calibração realizada na instalação do equipamento, em condições de céu claro. Entretanto, como ao longo do experimento ocorrem variações deste valor devido tanto a mudanças nas condições de propagação em céu claro como a alterações realizadas em intervenções de manutenção, o programa calcula a média diária da potência recebida expurgando eventos de atenuação por chuvas. Esta média é utilizada como potência nominal de referência para cada dia analisado.

De (4.3) e (4.5), obtém-se que a distribuição cumulativa da atenuação por chuvas é dada por:

$$F_A(A) = 1 - F_{P_R}(P_{R\text{nom}} - A) \quad (4.6)$$

onde:

$F_A(A)$ = Distribuição cumulativa da taxa de precipitação.

4.3.3

Distribuição Cumulativa da Atenuação Diferencial

A distribuição cumulativa da atenuação diferencial por chuvas de um par de enlaces convergentes, designados 1 e 2, é obtida de forma análoga à utilizada para determinar a distribuição cumulativa da atenuação por chuvas de um enlace individual, mas a partir de séries temporais obtidas tomando, para cada amostra, a diferença entre as atenuações instantâneas, A_1 e A_2 , de cada enlace.

Cabe destacar que séries temporais correspondentes à diferença dos valores instantâneos $A_1 - A_2$ são opostas às séries temporais correspondentes da diferença dos valores instantâneos $A_2 - A_1$. Portanto, a distribuição cumulativa correspondente à atenuação diferencial por chuvas de $A_1 - A_2$ (F_{12}) é diferente à distribuição cumulativa correspondente à atenuação diferencial por chuvas de $A_2 - A_1$ (F_{21}) ou seja:

$$F_{12}(A_1 - A_2) \neq F_{21}(A_2 - A_1) \quad (4.7)$$

É necessário, portanto, determinar ambas as distribuições a fim de caracterizar completamente a atenuação diferencial por chuva entre os enlaces.

As distribuições cumulativas da atenuação por chuvas para um enlace e da atenuação diferencial por chuvas para um par de enlaces foram obtidas com uma resolução de 0,5 dB.

4.4

Resultados das Medidas Realizadas

As distribuições cumulativas de probabilidades da atenuação medida são mostradas na figura 13, para Brasília, e na figura 14, para o Rio de Janeiro. As distribuições cumulativas de probabilidades da taxa de precipitação em cada local são mostradas na figura 15.

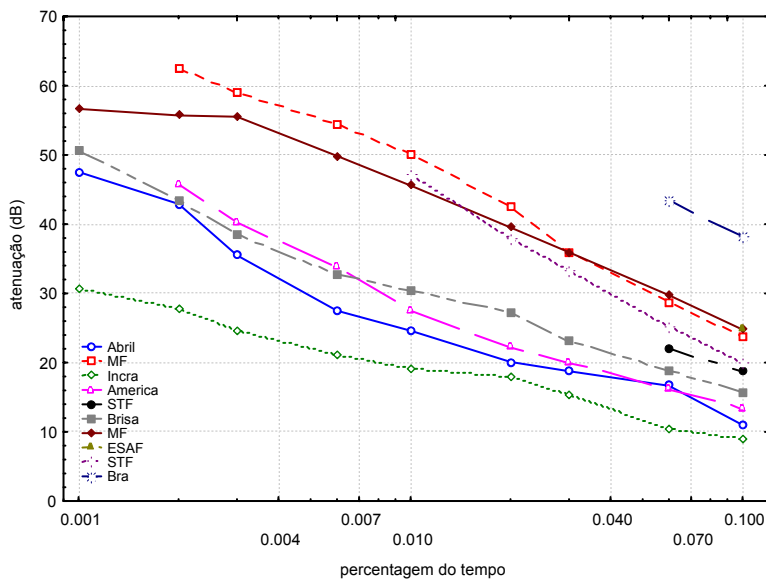


Figura 13 – Distribuições cumulativas da atenuação medida em Brasília

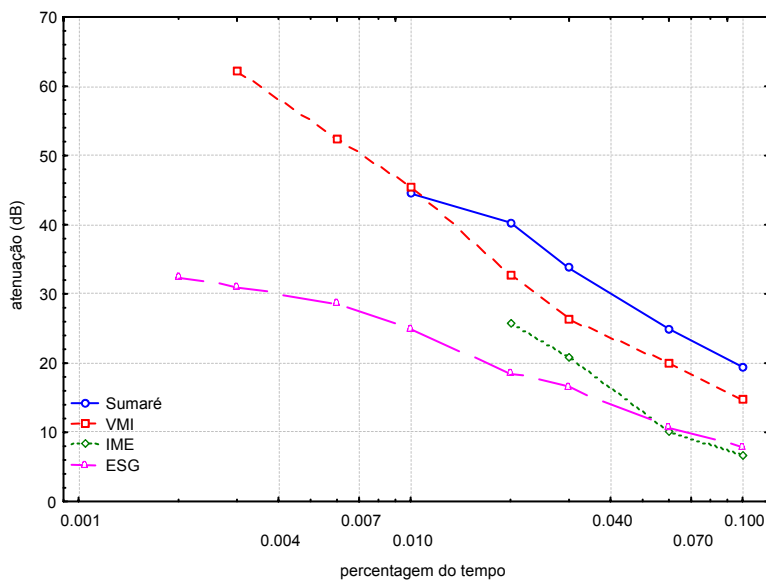


Figura 14 – Distribuições cumulativas da atenuação medida no Rio de Janeiro

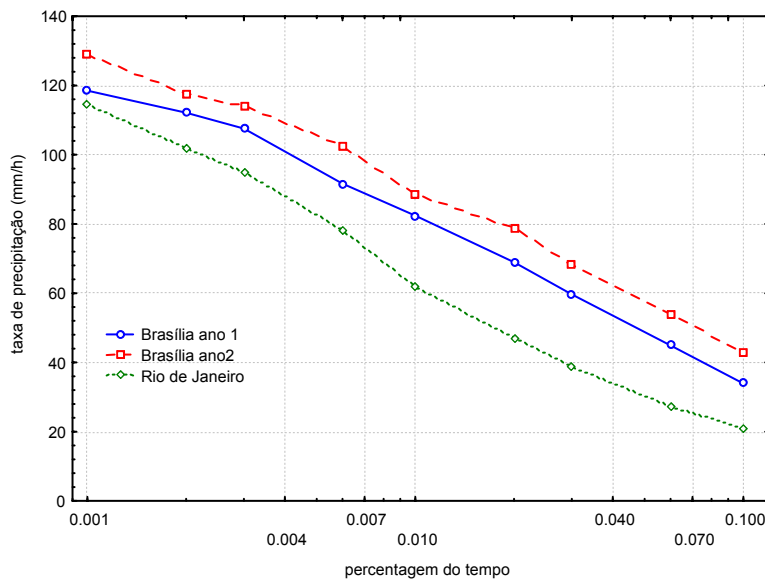


Figura 15 – Distribuições cumulativas da taxa de precipitação medida

4.5

Banco de Dados de Medidas Existentes

No desenvolvimento de novos modelos para a previsão da atenuação por chuvas em enlaces terrestres e via satélite foram utilizados, além dos resultados obtidos neste trabalho, todo o banco de dados de medidas disponibilizado pelo UIT-R, além de resultados de medidas anteriores no Brasil, ainda não incorporadas a este banco de dados.

4.5.1

Base de Dados de UIT-R [60]

Medidas de atenuação por chuvas têm sido realizadas em muitos lugares do mundo, em diferentes frequências e em enlaces de diversos comprimentos. Porém, considera-se oficial a base de dados do UIT-R, denominada DB-SG5 [61] na qual, para que os resultados de um experimento sejam incluídos, existem requisitos mínimos de consistência, tempo de medida e qualidade dos dados.

A base de dados DB-SG5, em enlaces terrestres, é formada, atualmente, por medidas concorrentes de taxa de precipitação e atenuação por chuvas realizadas

em diversos países, num total de 62 enlaces, operando numa ampla faixa de frequências variando desde 7,0 GHz até 137 GHz, conforme mostrado na tabela 9.

Tabela 9 – Frequências de operação dos enlaces terrestres da base de dados de UIT-R

Frequência (GHz)	Número de enlaces
7,0	1
10,8 a 19,4	32
21,2 a 29,3	8
34,5 a 39,0	11
57,0	4
81,8	1
97,0	4
137,0	1

Os comprimentos desses 62 enlaces varia desde 0,5 Km até 58 Km, como pode ser visto na tabela 10.

Tabela 10 – Comprimento dos enlaces terrestres da base de dados de UIT-R

Comprimento (km)	Quantidade
0,5 – 5	21
5 – 10	11
10 – 20	18
20 – 30	5
30 – 40	4
40 - 50	1
50 - 58	2

Para enlaces satélite, a base de dados é composta de : 418 enlaces, operando em uma faixa de frequência variando de 6,2 a 30 GHz e com comprimentos L_s até a altura de chuva de 3,7 até 41 km, conforme apresentado nas tabelas 10 e 11.

Tabela 11 – Comprimento dos enlaces satélite da base de dados de UIT-R

Frequência	Quantidade
6,2	1
11 a 15	32
16 a 20	8
28 a 29	11
30	4

Tabela 12 – Frequência de operação dos enlaces satélite da base de dados de UIT-R

Comprimento L_s	Número de
2 – 8	334
8 – 13	38
13 - 20	20
20 - 30	20
30 - 40	6

Maiores detalhes sobre as características destes enlaces são mostradas no Anexo 1.

4.4.2

Experimentos Realizados Anteriormente no Brasil [60]

No Brasil também têm sido realizadas importantes campanhas de medidas da atenuação por chuvas em enlaces terrestres [62-66]. Parte dos resultados já se encontra no DB-SG5 e, parte deles, mais recentes, ainda estão por ser incorporados. As características destes enlaces, que também compuseram a base de dados usada na modelagem realizada neste trabalho, são mostradas no Anexo 1.