



**Henrique Grynszpan**

**Extensão do Modelo de Misme e Fimbel para a  
Determinação da Distribuição Cumulativa da Atenuação  
Diferencial Devida à Chuva Entre Dois Enlaces  
Convergentes**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Rio de Janeiro

Julho de 2008



**Henrique Grynszpan**

**Extensão do Modelo de Misme e Fimbel para a  
Determinação da Distribuição Cumulativa da  
Atenuação Diferencial Devida à Chuva entre Dois  
Enlaces Convergentes**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa.**  
**Orientador**

Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Mauro Soares de Assis**  
UFF

**Prof. Jorge Luis R. Pedreira de Cerqueira**  
IME

**Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**  
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
Centro de Estudos de Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de julho de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

## Henrique Grynszpan

Graduou-se em Engenharia Eletrônica no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em 1970. Foi engenheiro da EMBRATEL por trinta anos, atuando na área de projetos e implantação de troncos e enlace de microondas, administração do espectro e estudos de interferências entre sistemas do serviço fixo e do serviço fixo por satélite. Tem diversos cursos de pós-graduação, formação e extensão. Desde 2006, é engenheiro da PETROBRAS.

### Ficha Catalográfica

Grynszpan, Henrique

Extensão do modelo de misme e fimbrel para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação diferencial devida à chuva entre dois enlaces convergentes / Henrique Grynszpan ; orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa. – 2008.

75 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Atenuação diferencial devida à chuva. 3. Enlaces convergentes. 4. Modelo de Misme e Fimbrel. 5. Disponibilidade. I. Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Emanuel Paiva da Oliveira Costa, pelo conhecimento transmitido, dedicação e paciência durante a realização deste trabalho.

À minha família, principalmente à minha esposa Lucy de Lima Grynszpan, que com toda sua dedicação, paciência, redução das horas de convívio, me deu apoio em todos os momentos e principalmente nos mais difíceis.

Aos professores do CETUC, pelos ensinamentos.

Aos colegas da PUC e do CETUC Daniel Fleischman, Eleonora Andrade, Fabrício Barros e Marco Aurélio Nunes da Silva, pelo apoio dado na parte computacional.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

## Resumo

Grynszpan, Herique; Costa, Emanuel. **Extensão do Modelo de Misme e Fimbel para a Determinação da Distribuição Cumulativa da Atenuação Diferencial Devida à Chuva Entre Dois Enlaces Convergentes**. Rio de Janeiro, 2008. 75 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, desenvolveremos um modelo teórico baseado em extensão do modelo de Misme e Fimbel para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação diferencial devida à chuva entre dois enlaces convergentes. Resultados do modelo desenvolvido serão comparados com medidas realizadas na cidade de São Paulo e no Japão. Adicionalmente, apresentaremos previsões do modelo para os efeitos das variações do ângulo entre os enlaces, assim como dos seus comprimentos, sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial. Em seguida, calcularemos a indisponibilidade do enlace desejado sujeito à interferência de outro enlace convergente, indicando que a consideração da atenuação simultânea nos dois enlaces permite um dimensionamento capaz de utilizar o espectro eletromagnético de forma mais eficiente.

## Palavras-chave

Atenuação diferencial devida à chuva; enlaces convergentes; modelo de Misme e Fimbel; indisponibilidade.

## Abstract

Grynszpan, Herique; Costa, Emanuel. **Extension of the Misme and Fimbel Model for the Determination of the Cumulative Distribution of the Rain Differential Attenuation Between Two Converging Links.** Rio de Janeiro, 2008. 75 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, we will develop a theoretical model based on an extension of the Misme and Fimbel model for the determination of the cumulative distribution of the rain differential attenuation between two converging links. Results from the developed model will be compared with measurements performed in the City of São Paulo and in Japan. Additionally, we will present model predictions for the effects of variations in the angle between the links and in the path lengths on the cumulative distribution of the rain differential attenuation. Next, we will determine the unavailability of a link in the presence of interference from another converging link. It will be indicated that consideration of the possibility of simultaneous attenuation on both links leads to a more efficient use of the electromagnetic spectrum.

## Keywords

Rain differential attenuation; converging links; Misme and Fimbel model; unavailability.

## Sumário

1 – Introdução	13
1.1. Descrição e motivação	13
1.2. Métodos disponíveis na literatura para o cálculo da distribuição cumulativa de atenuação diferencial entre enlaces convergentes	14
1.3. Cálculo da distribuição cumulativa da atenuação diferencial devida à chuva entre dois enlaces convergentes e sua aplicação no cálculo da indisponibilidade	15
1.4. Descrição dos capítulos	16
2 – Métodos disponíveis na literatura para o cálculo da distribuição cumulativa de atenuação diferencial entre enlaces convergentes	18
2.1. Artigo de Morita e Higuti [3]	20
2.2. Artigo de Panagopoulos e Kanellopoulos [5]	22
2.3. Artigo de Perez Garcia et al. [9]	24
3 – O modelo de Misme e Fimbel para o cálculo da distribuição cumulativa de atenuação devida à chuva em um enlace isolado	25
3.1. Descrição do modelo	25
3.2. Parâmetros utilizados	30
4 – Extensão do modelo de Misme e Fimbel para a determinação da distribuição cumulativa da atenuação diferencial entre dois enlaces convergentes	34
4.1. Distribuição cumulativa conjunta das atenuações nos dois enlaces convergentes.	34
4.2. Determinação da área comum aos dois lugares geométricos relativos aos enlaces desejado e interferente	36
4.3. Determinação da distribuição cumulativa da atenuação Diferencial	37

5 – Comparações entre resultados teóricos e experimentais e previsões do modelo	41
5.1 - Comparação com medidas efetuadas em São Paulo na faixa de 15 GHz	41
5.2 - Comparação com medidas feitas no Japão na faixa de 19 GHz	50
5.3- Previsões do modelo	53
5.3.1- Previsão do modelo para o efeito da variação do ângulo entre os enlaces sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial	53
5.3.2- Previsão do modelo para o efeito da variação no comprimento do enlace interferente sobre a distribuição cumulativa da atenuação diferencial	56
6 – A indisponibilidade do enlace desejado	59
6.1. Ruído térmico	60
6.2. Efeito da atenuação diferencial devida à chuva sobre a indisponibilidade de um enlace	61
6.3. Dois enlaces convergentes juntamente com ruído térmico e interferência fixa de outros enlaces	64
6.4. Múltiplos enlaces convergentes sujeitos a atenuação devida à chuva	66
6.4.1- Um exemplo de cálculo de indisponibilidade para três enlaces interferentes, convergentes com o enlace desejado, formando ângulos de 12°, 20° e 50°(considera os dados do item 6.2)	67
7 – Conclusões	69
8 – Referências bibliográficas	71
Anexo 1- Construção do lugar geométrico de Misme e Fimbel	73

## Lista de Figuras

Figura 3.1 - Lugar geométrico dos centros de célula de chuva (círculos com diâmetro $d(R)$ ) que interceptam o enlace AB com um comprimento igual ou superior a $L_0$	26
Figura 3.2 - Configuração dos enlaces convergentes na estação de Rua dos Ingleses (RIS), São Paulo	32
Figura 3.3 - Configuração dos enlaces convergentes no Masashino Electrical Communication Laboratory (ECL), Japão. Adaptada das referências [1]-[3].	32
Figura 3.4 - Determinação dos parâmetros $d_0$ e $\beta$ para os enlaces utilizados nas medidas. Dados do Japão adaptados das referências [1]-[3].	33
Figura 4.1 - Enlaces desejado AB e interferente AC, lugares geométricos correspondentes e interseção entre ambos (polígono $I_2V''_1I_1V'_4$ )	35
Figura 4.2 - Região (R) de interesse para a determinação de $\Pr\{a_1 - a_2 > A_0\}$ por intermédio da integração da função densidade de probabilidade $p_{a_1, a_2}(A_1, A_2)$ .	38
Figura 4.3 - Região de interesse (em negrito) para o cálculo parcial de $\Pr\{a_1 - a_2 > A_0\}$ diretamente a partir da distribuição cumulativa conjunta das atenuações $a_1$ e $a_2$	39
Figura 5.1 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces C15 (12,8 km) e BAR (21,7 km), que formam o ângulo de $70,4^\circ$	42
Figura 5.2 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BRA (12,8 km) e BAR (21,7 km), que formam o ângulo de $11,9^\circ$	43
Figura 5.3 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BRA (12,8 km) e C15 (12,8 km), que formam o ângulo de $58,5^\circ$	44
Figura 5.4 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BAR (21,7 km) e PAR (41,3 km), que formam o ângulo de $164^\circ$	45

- Figura 5.5 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces C15 (12,8 km) e PAR (43 km), que formam o ângulo de  $93,6^\circ$  46
- Figura 5.6 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces BRA (12,8 km) e PAR (43 km), que formam o ângulo de  $152^\circ$  47
- Figura 5.7 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces Shakujii – ECL (4,3 km) e Sakai – ECL (2,9 km), que formam o ângulo de  $163^\circ$ . Dados reproduzidos das referências [1]-[3]. 51
- Figura 5.8 - Distribuições cumulativas calculadas e medidas para a atenuação diferencial nos enlaces Shakujii – ECL (4,3 km) e Shinkawa – ECL (4,7 km), que formam o ângulo de  $115^\circ$ . Dados reproduzidos das referências [1]-[3]. 52
- Figura 5.9 - Distribuições cumulativas da atenuação diferencial apresentadas da esquerda para a direita, na ordem crescente dos ângulos entre enlaces que variaram entre  $5^\circ$  e  $45^\circ$  com intervalos de  $5^\circ$  e entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$  com intervalos de  $15^\circ$ , supondo enlaces situados na região de São Paulo ( $d_o = 7$  km e  $\beta = 0,4$ ) de comprimentos iguais a 10 km e 20 km 54
- Figura 5.10 - Relação entre o ângulo formado pelos enlaces e os valores da atenuação diferencial correspondentes às percentagens de tempo iguais a 0,1% (curva tracejada) e 0,01% (curva contínua) 55
- Figura 5.11 - Distribuições cumulativas da atenuação diferencial apresentadas da direita para a esquerda, na ordem crescente dos comprimentos do enlace interferente (2 km, 3 km, 4 km, 5 km, 7 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 60 km), fixados o comprimento do enlace desejado em 10 km e o ângulo entre eles em  $15^\circ$  57
- Figura 5.12 - Relação entre o comprimento variável do enlace interferente e os valores da atenuação diferencial correspondentes às percentagens de tempo de iguais a 0,1% (curva tracejada) e 0,01% (curva contínua), fixados o comprimento do enlace desejado em 10 km e o ângulo entre eles em  $15^\circ$  58
- Figura 6.1 - Distribuições cumulativas da relação C/I de acordo com os procedimentos conservador (curvas tracejadas com símbolos ociosos, obtidas considerando apenas a atenuação no enlace desejado) e realista (curvas contínuas com símbolos cheios, obtidas considerando a atenuação diferencial entre os dois enlaces), para três valores da relação  $(C/I)_o$  ou, equivalentemente, da separação angular entre os enlaces 63

Figura 6.2 - O cálculo de indisponibilidade corresponde à integração da função densidade de probabilidade, na região de interesse (R) 64

Figura 6.3 - Indisponibilidade no caso do ruído térmico ser significativo face à interferência. Além da região (R), integramos a f.d.p na região (R<sub>2</sub>), situada acima da reta  $a_1=A_{th}$ . e simultaneamente abaixo da reta  $a_1 - a_2 = A_0$  65

Figura A.1: Construção do lugar geométrico de Misme e Fimbel (observar que quando  $L_0$  diminui, aumentam as dimensões do lugar geométrico: como  $(d/2)$  é constante aumenta a altura (h), e também o lado do retângulo  $EF = AB - L_0$ ) 73

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Dados dos enlaces utilizados nas medidas

33