



Erminio Da Cás Neto

**Compartilhamento de frequências entre
estações terrenas do Serviço Fixo por
Satélite implantadas de maneira ubíqua e
receptores do Serviço Fixo Terrestre**

Dissertação de Mestrado

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.

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Abril de 2016



Erminio Da Cás Neto

**Compartilhamento de frequências entre
estações terrenas do Serviço Fixo por
Satélite implantadas de maneira ubíqua e
receptores do Serviço Fixo Terrestre**

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. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Ernesto Leite Pinto

IME

Prof. Raimundo Sampaio Neto

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Abril de 2016

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

Erminio Da Cás Neto

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Brasil). Especializou-se na Télécom ParisTech (Paris, França) em Sistemas de Comunicação e em Redes Celulares e Mobilidade.

Ficha Catalográfica

Da Cás Neto, Erminio

Compartilhamento de frequências entre estações terrenas do Serviço Fixo por Satélite implantadas de maneira ubíqua e receptores do Serviço Fixo Terrestre/ Erminio Da Cás Neto; orientador: José Mauro Pedro Fortes – 2016.

67 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Serviço Fixo Terrestre. 3. Serviço Fixo por Satélite 4. Compartilhamento de frequências. 5. Interferência. 6. Terminais com distribuição ubíqua. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Não poderia começar este agradecimento de outra forma senão por aqueles que me proporcionaram chegar até aqui. Agradeço imensamente aos meus pais, Norton e Helena, por terem me ensinado a importância do estudo e pela educação que me deram, tanto por meio de palavras quanto de exemplos, proporcionando meu desenvolvimento pessoal e acadêmico, permitindo que eu chegasse até aqui. Agradeço também aos meus irmãos Mariana e Breno, pelo companheirismo e apoio sempre mostrados.

Gostaria de agradecer também aos meus avós, pelo carinho e incentivo sempre presentes em minha vida. Em especial aos que não estão mais aqui, Erminio e Evandro, exemplos de integridade que levarei por toda vida.

Um agradecimento especial à minha amada esposa Juliana, por toda paciência e compreensão durante os inúmeros dias de dedicação a este trabalho, nos quais sem seu apoio, sua realização teria sido muito mais difícil.

Agradeço também ao Professor José Mauro, presente ao longo de toda a jornada do mestrado como um estimado professor e orientador. Sem seus conselhos e orientações esse trabalho não teria sido possível.

Resumo

Da Cás Neto, Erminio; Fortes, José Mauro Pedro. **Compartilhamento de frequências entre estações terrenas do Serviço Fixo por Satélite implantadas de maneira ubíqua e receptores do Serviço Fixo Terrestre**. Rio de Janeiro, 2016. 67p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O crescente interesse em Sistemas de alta densidade do Serviço Fixo por Satélite (High Density Fixed-Satellite Services – HDFSS) deu origem a estudos na União Internacional de Telecomunicações (UIT) para que sua implantação siga recomendações no intuito de minimizar a interferência em outros serviços de telecomunicações. Tais sistemas são interessantes devido à sua flexibilidade na implantação ubíqua de terminais de pequeno porte, sem a necessidade de coordenação. Com o objetivo de regulamentar a implantação de tais sistemas, o Grupo de Estudos 4 do Setor de Radiocomunicações da UIT, que trata do serviço fixo por satélite, tem desenvolvido e sugerido estudos visando à criação de uma recomendação contendo metodologias para o compartilhamento de frequências envolvendo estações terrenas (terminais) ubiquamente distribuídas. Assim, em 2003, na Conferência Mundial de Radiocomunicações da UIT, foram identificadas faixas de frequências específicas para a operação de sistemas HDFSS, sendo que grande parte das faixas de frequência identificadas é compartilhada, em caráter primário, com os sistemas do Serviço Fixo Terrestre (FS) e, por este motivo, é importante que sejam desenvolvidos estudos para regulamentação e o controle deste compartilhamento. No âmbito da UIT a principal motivação desses estudos é a análise da interferência provocada por sistemas HDFSS implantados em um país em serviços que compartilham a mesma frequência em um país vizinho. É neste cenário que o presente trabalho propõe uma metodologia para avaliação da interferência produzida por terminais ubiquamente distribuídos em sistemas FS. Essa metodologia visa a determinação de uma região de coordenação, possibilitando, assim, que terminais sejam implantados livremente fora desta região, garantindo níveis adequados de interferência nos sistemas FS.

Palavras-chave

Serviço Fixo Terrestre; Serviço Fixo por Satélite; compartilhamento de frequências; interferência; terminais com distribuição ubíqua.

Abstract

Da Cás Neto, Erminio; Fortes, José Mauro Pedro (adviser). **Frequency sharing between ubiquitously deployed Fixed-Satellite Service earth stations and stations of the terrestrial services**. Rio de Janeiro, 2016. 67p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing interest in High-Density Fixed Service Satellite systems (HDFSS) has led to studies at the International Telecommunication Union (ITU) aiming the development of a recommendation for guidance on its implementation in order to minimize interference affecting other telecommunications services. Such systems are of interest due to their flexibility in the ubiquitous deployment of small terminals, without the need for coordination. In order to regulate the implementation of such systems, the Study Group 4 of the ITU Radiocommunication Sector, responsible for the fixed-satellite service, has developed and suggested studies aimed at creating a recommendation containing methodologies for frequency sharing involving earth stations (terminals) ubiquitously distributed. Thus, in 2003, at the World Radiocommunication Conference of the ITU, specific frequency bands for HDFSS systems operation have been addressed, and most of the frequency bands identified are shared, on a primary basis, with the terrestrial fixed service systems (FS) and, for this reason, such studies for regulation and control of this share has become important. The ITU main motivation for these studies is the analysis of the interference caused by the HDFSS systems deployed in a country, into the communication services of neighboring countries. In this scenario, this paper proposes a methodology for evaluating interference produced by a ubiquitously distributed terminals into FS systems. This method aims at determining a coordination region, thus enabling terminals to be freely deployed outside this region, without producing unacceptable levels of interference into the FS receivers.

Keywords

Fixed Service; Fixed-Satellite Service; frequency sharing; interference; ubiquitously deployed terminals.

Sumário

1	Introdução	12
2	Modelo Matemático	16
2.1	Caso geoestacionário	16
2.2	Caso não-geoestacionário	21
3	Resultados numéricos	26
3.1	Cenário 1: constelação LEO-1	26
3.2	Cenário 2: constelação LEO-2	38
3.3	Cenário 3: constelação MEO	46
4	Conclusão	56
	Referências Bibliográficas	59
A	Procedimento para determinar o valor L_p da perda de propagação que não é excedido durante P % do tempo	61
A.1	Dados de entrada	62
A.2	Análise do ambiente em torno da estação terrena	63
A.3	Atenuação devido ao entorno da estação terrena	64
A.4	Absorção gasosa	65
A.5	Dutos	65
A.6	Espalhamento troposférico	65
A.7	Parâmetros do percurso	66
A.8	Predição da perda de propagação	66

Lista de figuras

1.1	Exemplo de uma área de coordenação de uma estação terrena operando com um satélite geoestacionário.	13
2.1	Esquema ilustrativo da interferência produzida pela estação terrena de um enlace via satélite em um receptor do Serviço Fixo Terrestre.	16
2.2	Distribuição cumulativa de probabilidade da densidade de potência interferente.	19
2.3	Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da perda de propagação.	20
2.4	Ilustração de uma função distribuição cumulativa de probabilidade da interferência e critérios de interferência.	21
2.5	Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da perda de propagação associada ao limite L_p .	22
2.6	Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da variável aleatória x .	25
2.7	Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da variável x associada ao limite X_j satisfazendo ao ao critério da Rec. ITU-R F.1495.	25
3.1	Ilustração das trilhas da constelação LEO-1.	27
3.2	Diagrama de radiação da antena da estação terrena.	30
3.3	Comportamento da CDF do ângulo θ nas direções do azimute de 90° (linha vermelha), 180° (linha preta) e 0° (linha azul) em torno de um receptor FS (62°S , $29,2^\circ\text{W}$) para estações terrenas distantes 0 (linha contínua), 100 (linha tracejada) e 200 km (linha pontilhada) do receptor FS.	31
3.4	CDF do ângulo θ para estações terrenas no azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).	32
3.5	Função densidade de probabilidade do ganho g_t para uma estação terrena, comunicando com a constelação LEO-1, ao longo do azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).	33
3.6	Área de coordenação de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$) sob a influência da constelação LEO-1, considerando o relevo do entorno, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.	34
3.7	Área de coordenação de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$) sob a influência de um único satélite da constelação LEO-1, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.	35
3.8	Comparação entre áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ obtidas sob a influência da comunicação com a constelação LEO-1 (representada pela cor vermelha) e com um satélite parado (representada pela cor preta), considerando o relevo no entorno do receptor FS.	36

3.9	Região de coordenação, baseada na constelação LEO-1, na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.	37
3.10	Ilustração das trilhas da constelação LEO-2.	38
3.11	Comportamento da CDF do ângulo θ nas direções do azimute de 90° (linha vermelha), 180° (linha preta) e 0° (linha azul) em torno de um receptor FS (62°S , $62,3^\circ\text{E}$) para estações terrenas distantes 0 (linha contínua), 100 (linha tracejada) e 200 km (linha pontilhada) do receptor FS.	40
3.12	CDF do ângulo θ para estações terrenas no azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).	41
3.13	Função densidade de probabilidade do ganho g_t para uma estação terrena, comunicando com a constelação LEO-2, no azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).	42
3.14	Área de coordenação de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$) sob a influência da constelação LEO-2, considerando o relevo do entorno, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.	43
3.15	Área de coordenação de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$) sob a influência de um único satélite da constelação LEO-2, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.	44
3.16	Comparação entre áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ obtidas para comunicação com a constelação LEO-2 (representada pela cor vermelha) e com um satélite parado (representada pela cor preta), considerando o relevo no entorno do receptor FS.	45
3.17	Região de coordenação, baseada na constelação LEO-2, na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.	46
3.18	Ilustração das trilhas da constelação MEO.	47
3.19	Comportamento da CDF do ângulo θ nas direções do azimute de 90° (linha vermelha), 180° (linha preta) e 0° (linha azul) em torno de um receptor FS (62°S , $8,41^\circ\text{W}$) para estações terrenas distantes 0 (linha contínua), 100 (linha tracejada) e 200 km (linha pontilhada) do receptor FS.	49
3.20	CDF do ângulo θ para estações terrenas no azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).	50
3.21	Função densidade de probabilidade do ganho g_t para uma estação terrena, comunicando com a constelação MEO, no azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).	51
3.22	Área de coordenação de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$) sob a influência da constelação MEO, considerando o relevo do entorno, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.	52
3.23	Área de coordenação de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$) sob a influência de um único satélite da constelação MEO, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.	53

3.24	Comparação entre áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ obtidas sob a influência da comunicação com a constelação MEO (representada pela cor vermelha) e com um satélite parado (representada pela cor preta), considerando o relevo no entorno do receptor FS.	54
3.25	Região de coordenação, baseada na constelação MEO, na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.	55
3.26	Regiões de coordenação na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.	55
A.1	Diagrama em blocos das etapas dos cálculos aplicados.	62
A.2	Ilustração do cálculo do ângulo de elevação do horizonte e do método do arco convexo.	64
A.3	Iteração realizada no algoritmo para calcular o valor L_p .	67

Lista de tabelas

3.1	Dados da constelação LEO-1.	27
3.2	Dados do receptor FS.	28
3.3	Dados da estação terrena LEO-1.	28
3.4	Dados da constelação LEO-2.	38
3.5	Dados da estação terrena LEO-2.	39
3.6	Dados da constelação MEO.	47
3.7	Dados da estação terrena MEO.	48

1

Introdução

Sistemas de alta densidade do serviço fixo por satélite (High Density Fixed-Satellite Services - HDFSS) têm despertado interesse devido à sua flexibilidade na implantação ubíqua de terminais de pequeno porte, sem a necessidade de coordenação. Estes terminais não necessitam de licença individual para operação, sendo habilitados, dessa forma, a operar sob uma licença geral do sistema.

Em 2003, durante a Conferência Mundial de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (UIT), WRC'2003, foram identificadas faixas de frequências específicas para a operação de sistemas HDFSS. No entanto, grande parte das faixas de frequência identificadas é compartilhada, em caráter primário, com os sistemas do Serviço Fixo Terrestre (FS) e, por este motivo, é importante o desenvolvimento de estudos e análises técnicas que permitam a regulamentação e o controle deste compartilhamento.

Neste intuito, o Grupo de Estudos 4 do Setor de Radiocomunicações da UIT, que trata do serviço fixo por satélite, tem desenvolvido estudos visando à criação de uma recomendação contendo metodologias para o compartilhamento de frequências envolvendo estações terrenas (terminais) ubiquamente distribuídas [1, 2]. Os sistemas HDFSS podem operar com satélites em qualquer tipo de órbita, contudo, os satélites não-geoestacionários de órbita baixa (Low Earth Orbit – LEO) e de órbita média (Medium Earth Orbit – MEO) são os mais indicados para estes sistemas devido ao tamanho e custo reduzidos de seus terminais. Tais terminais de baixo custo e portáteis seriam o grande atrativo desses sistemas, possibilitando, assim, sua utilização em larga escala.

Do ponto de vista técnico, a coordenação, na mesma área geográfica, entre sistemas FS e sistemas HDFSS com um grande número de terminais, ambos operando na mesma faixa de frequências, pode se tornar demasiadamente complexa. Se, por exemplo, um determinado país escolhe destinar determinada faixa de frequências para uso exclusivo de sistemas FS e um país vizinho decide destinar a mesma faixa para uso exclusivo de sistemas HDFSS, é criado um cenário que pode resultar em interferências inaceitáveis na região fronteira entre os dois países. Somando-se a esse fato o desconhecimento da precisa

localização dos terminais, a avaliação individual para a coordenação entre sistemas seria ainda mais complexa.

Nesta situação, torna-se necessária a determinação de uma região, ao longo da fronteira, na qual a implantação de terminais HDFSS só é possível por meio de um processo de coordenação entre os receptores FS e os terminais HDFSS (região ou área de coordenação). Fora desta região, os terminais do sistema HDFSS podem ser implantados sem a necessidade de coordenação, o que constitui o principal atrativo de sistemas que utilizam terminais com distribuição ubíqua.

O conceito de área de coordenação é antigo e foi desenvolvido inicialmente para coordenações envolvendo estações terrenas que operam com satélites geoestacionários. Sua determinação depende diretamente do critério utilizado na proteção do sistema vítima. Uma metodologia para a determinação destas áreas de coordenação é apresentada no Apêndice 7 do Regulamento de Radiocomunicações (RR) da UIT [3]. Esta metodologia sugere cenários e modos de propagação adaptados a cada tipo de aplicação, fornecendo um meio de se calcular a perda de propagação que, para uma dada distância, não é excedida com probabilidade inferior a um valor de probabilidade especificado. Resultados baseados nessa metodologia são da forma apresentada na Figura 1.1.

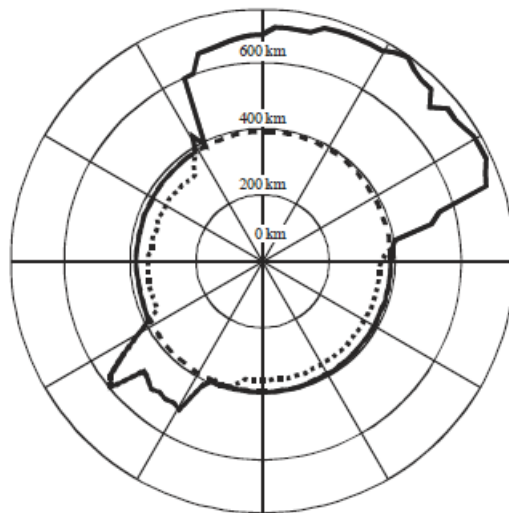


Figura 1.1: Exemplo de uma área de coordenação de uma estação terrena operando com um satélite geoestacionário.

Fonte: Apêndice 7 do RR.

Note que a Figura 1.1 forma uma região ao redor de um ponto central onde está localizado o receptor vítima/transmissor interferente (neste exemplo, uma estação terrena). Assim, qualquer sistema que opere na mesma faixa de frequência desta estação (sistema interferente/vítima) necessita de estudos

de coordenação caso deseje operar no interior desta região. Caso contrário, estando fora desta região, garante-se que os critérios de proteção do sistema vítima sejam satisfeitos. Vale ressaltar que o procedimento do Apêndice 7 foi desenvolvido para determinar a área de coordenação em torno de uma estação terrena do Serviço Fixo por Satélite de modo a protegê-la de interferência. Neste trabalho, um procedimento análogo será utilizado para a proteção de receptores do Serviço Fixo Terrestre, ou seja, na determinação de uma área de coordenação em torno de um receptor FS de modo a protegê-lo das interferências produzidas por estações terrenas do HDFSS.

Conforme já mencionado, no presente trabalho, este tipo de metodologia é utilizado para a proteção, na região fronteiriça, de serviços que operam em países vizinhos e compartilham a mesma faixa de frequências. Destarte, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para determinação de uma área de coordenação onde estações terrenas transmissoras possam ser ubiquamente distribuídas dentro de um território e ainda garantir a proteção de sistemas FS que possam estar localizados em qualquer lugar em um país adjacente.

Assim, o trabalho propõe uma metodologia para determinação da região de coordenação, baseada no procedimento do Apêndice 7 do RR, e que considera os critérios de interferência utilizados na proteção dos sistemas FS e a caracterização estatística dos parâmetros relacionados ao movimento orbital da constelação de satélites não-geoestacionários considerada. Mais especificamente, foi considerado um critério de proteção análogo ao da Recomendação ITU-R F.1495 [4], que impõe restrições ao comportamento estatístico da razão interferência-ruído (I/N) na entrada do receptor FS.

Adicionalmente, no que tange ao comportamento estatístico das posições dos satélites, o trabalho propõe métodos específicos, como o Método Analítico [5] e a simulação do movimento orbital de uma constelação, para a caracterização desse comportamento. Com base no modelo matemático desenvolvido, a metodologia é aplicada a três cenários específicos envolvendo a interferência produzida em um receptor FS pela emissão de estações terrenas que utilizam satélites em órbitas LEO (as quais são consideradas duas constelações com parâmetros diferentes) e MEO, respectivamente.

No Capítulo 2 é elucidado o modelo matemático desenvolvido, sendo apresentadas na Seção 2.1 as particularidades do modelo no caso da interferência produzida pela comunicação de uma estação terrena e um satélite geoes-tacionário em um receptor FS e na Seção 2.2, o caso da interferência produzida pela comunicação de uma estação terrena e um satélite não-geoestacionário. No Capítulo 3 são elucidadas as características dos sistemas utilizados para

determinação dos resultados, sendo a Seção 3.1 dedicada aos resultados obtidos da aplicação da metodologia a satélites de uma órbita LEO, a Seção 3.2 dedicada aos resultados obtidos da aplicação da metodologia a satélites de uma órbita LEO polar e a Seção 3.3 dedicada aos resultados obtidos da aplicação da metodologia a satélites de órbita MEO. Por fim, o Capítulo 4 possui conclusões acerca do trabalho desenvolvido.

2

Modelo Matemático

Neste capítulo são elucidados os modelos matemáticos para dois cenários de comunicação, um envolvendo uma estação terrena e um satélite geoestacionário e outro envolvendo uma estação terrena e um satélite não-geoestacionário. Em ambos os casos é utilizada a premissa de que o sistema interferido, um sistema de Serviço Fixo Terrestre, está apontado na direção da estação terrena, possuindo assim ganho máximo de sua antena na direção da estação terrena. Nas seções a seguir são apresentados os modelos matemáticos envolvendo esses dois casos.

2.1

Caso geoestacionário

Para desenvolver o modelo matemático a ser utilizado nesse trabalho, considere inicialmente a geometria ilustrada na Figura 2.1

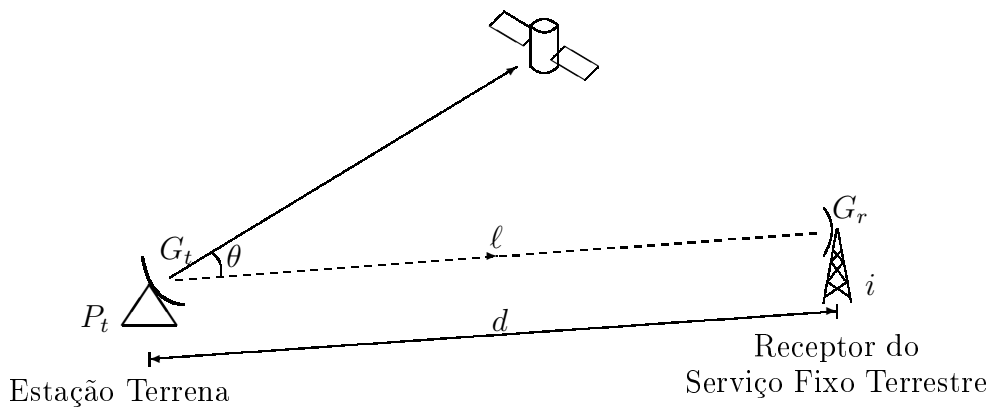


Figura 2.1: Esquema ilustrativo da interferência produzida pela estação terrena de um enlace via satélite em um receptor do Serviço Fixo Terrestre.

A densidade de potência interferente produzida pela emissão da estação terrena do enlace via satélite no receptor do Serviço Fixo Terrestre é dada por

$$i = P_t + G_t(\theta) + G_r - \ell \quad (2-1)$$

onde P_t é a densidade de potência do sinal transmitido pela estação terrena (em dB[W/MHz]), $G_t(\theta)$ é o ganho da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS (em dBi), G_r é o ganho máximo de recepção da antena receptora do FS (em dBi) e ℓ é a perda de propagação no percurso estação terrena-receptor FS, em dB. Note que, em (2-1), foi considerada uma situação de pior caso onde a antena receptora do FS aponta na direção da estação terrena interferente.

Neste trabalho, a perda de propagação ℓ é modelada por uma variável aleatória. Sua função distribuição de probabilidade $F_\ell(L) = P(\ell \leq L)$ foi determinada utilizando-se o modelo matemático e o procedimento apresentados no Anexo 1 do Apêndice 7 do Regulamento de Radiocomunicações da UIT [3]. Um resumo deste procedimento é apresentado no Apêndice A. Este modelo matemático permite calcular o valor L_p da perda de propagação que não é excedido durante P % do tempo. Em termos probabilísticos isto equivale a dizer que L_p corresponde à perda de propagação que não é excedida com probabilidade $P/100$, e que deve satisfazer à condição

$$P(\ell \leq L_p) = F_\ell(L_p) = p \quad (2-2)$$

onde $p = P/100$.

Note que, sendo a perda ℓ modelada por uma variável aleatória, a densidade de potência interferente i que atinge o receptor FS será também uma variável aleatória e sua função distribuição de probabilidade pode ser determinada a partir da função distribuição de probabilidade da variável ℓ e do relacionamento expresso em (2-1). Mais especificamente,

$$\begin{aligned} F_i(I) &= P(i \leq I) \\ &= P(P_t + G_t(\theta) + G_r - \ell \leq I) \\ &= P(\ell \geq P_t + G_t(\theta) + G_r - I) \\ &= 1 - F_\ell(P_t + G_t(\theta) + G_r - I) \end{aligned} \quad (2-3)$$

Observe que o nível de densidade de potência I_p , excedido durante P % do tempo, deve satisfazer à condição

$$P(i > I_p) = 1 - F_i(I_p) = F_\ell(P_t + G_t(\theta) + G_r - I_p) = p \quad (2-4)$$

o que, considerando (2-2), permite concluir que

$$L_p = P_t + G_t(\theta) + G_r - I_p \quad (2-5)$$

Conforme ilustrado na Figura 2.1, à medida em que a distância d entre a estação terrena e o receptor FS aumenta a probabilidade da densidade de potência interferente i ser maior que I_p diminui. Seja, então, d_p a distância que satisfaz à condição $P(i > I_p) = p$. Observe que

$$\begin{cases} \text{se } d < d_p, & \text{tem-se } P(i > I_p) > p \\ \text{se } d = d_p, & \text{tem-se } P(i > I_p) = p \\ \text{se } d > d_p, & \text{tem-se } P(i > I_p) < p \end{cases} \quad (2-6)$$

Neste ponto, considere o seguinte critério de proteção: a interferência no receptor FS é considerada aceitável se

$$P(i > I_p) < p. \quad (2-7)$$

Caso esta condição não seja satisfeita, é necessário que se proceda a um processo de coordenação entre os operadores dos sistemas envolvidos visando à elaboração de acordos de operação.

Note, de (2-6), que este processo de coordenação é somente necessário se a distância entre a estação terrena e o receptor FS for menor que d_p , ou seja, se $d < d_p$. Por este motivo, a distância d_p é usualmente conhecida como *distância de coordenação*.

Para determinar a distância de coordenação, a idéia é, na geometria ilustrada na Figura 2.1, aumentar a distância d até que a condição

$$P(i > I_p) = p \quad (2-8)$$

seja satisfeita.

A Figura 2.2 ilustra o comportamento da Distribuição Cumulativa de Probabilidade (ou, do inglês, Cumulative Distribution Function - CDF) da densidade de potência interferente i produzida no receptor do FS (definida por $P(i > I)$), resultante da variação do valor da distância d . Observe que, à medida em que a distância d aumenta, a curva $P(i > I)$ correspondente desloca-se para a esquerda. Ou seja, à medida em que a distância entre a estação terrena e o receptor FS aumenta, o valor da distribuição cumulativa de probabilidade da densidade de potência interferente i produzida no receptor do FS no ponto $I = I_p$ diminui.

Considerando (2-1), o critério de proteção em (2-7) pode ser escrito em função da perda de propagação ℓ . Com efeito, tem-se

$$P(P_t + G_t(\theta) + G_r - \ell > I_p) < p \quad (2-9)$$

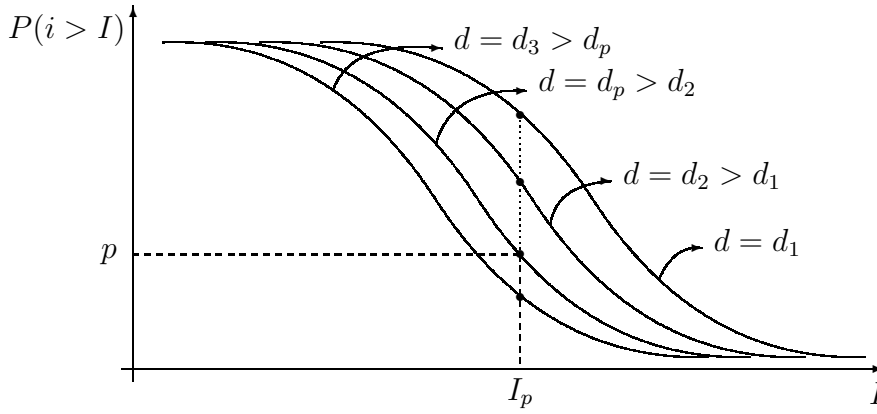


Figura 2.2: Distribuição cumulativa de probabilidade da densidade de potência interferente.

ou,

$$P(\ell < P_t + G_t(\theta) + G_r - I_p) < p \quad (2-10)$$

o que, considerando que ℓ é uma variável aleatória contínua, pode ser escrito como

$$P(\ell \leq P_t + G_t(\theta) + G_r - I_p) < p \quad (2-11)$$

ou ainda,

$$P(\ell \leq L_p) = F_\ell(L_p) < p \quad (2-12)$$

com L_p dado por (2-5).

Note que, de maneira análoga à (2-6), tem-se

$$\begin{cases} \text{se } d < d_p, & \text{tem-se } P(\ell \leq L_p) > p \\ \text{se } d = d_p, & \text{tem-se } P(\ell \leq L_p) = p \\ \text{se } d > d_p, & \text{tem-se } P(\ell \leq L_p) < p \end{cases} \quad (2-13)$$

Este comportamento é ilustrado na Figura 2.3. Nesta figura a função distribuição de probabilidade da variável aleatória ℓ desloca-se para direita à medida em que a distância entre a estação terrena e o receptor FS aumenta, ou seja, aumentando-se a distância d , a probabilidade da perda de propagação ℓ ser menor ou igual a L_p diminui. Assim, alternativamente, a distância de coordenação d_p pode ser determinada aumentando-se a distancia d na Figura 2.3 até que a condição

$$P(\ell \leq L_p) = p \quad (2-14)$$

seja satisfeita.

Observe que, estendendo-se esse conceito de distância de coordenação,

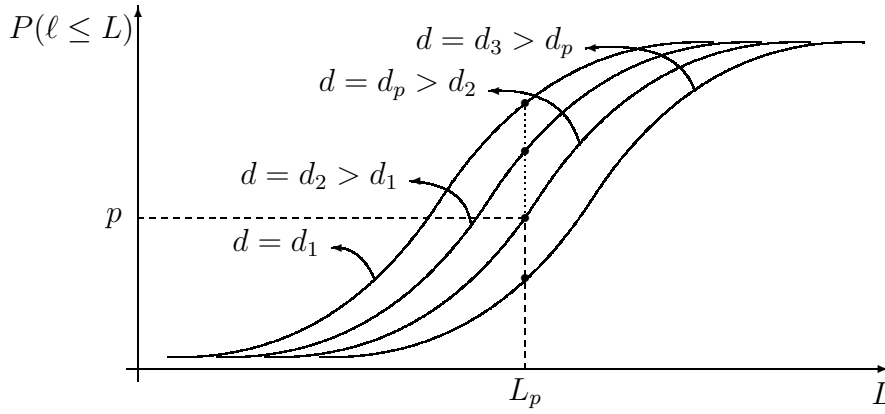


Figura 2.3: Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da perda de propagação.

pode-se estabelecer uma área ao redor do receptor FS fora da qual não é necessário que se proceda a um processo de coordenação entre os operadores. Tal área é usualmente conhecida como *área de coordenação* e sua determinação requer o cálculo da distância de coordenação em todas as direções em torno do receptor FS em questão.

Cabe ressaltar ainda que neste trabalho o critério utilizado para a proteção do receptor FS é um critério análogo ao descrito na Rec. ITU-R F.1495 [4]. Critérios deste tipo impõem restrições à distribuição cumulativa de probabilidade da razão interferência-ruído. Mais especificamente, as restrições são da forma

$$P\left(\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}} > A_j\right) < p_j, \quad j = 1, \dots, m \quad (2-15)$$

onde $(\frac{\mathcal{I}}{\mathcal{N}})$ corresponde à razão interferência-ruído expressa como razão de densidade de potências. Na Rec. ITU-R F.1495, por exemplo, $m = 3$, $A_1 = 10^{-1}$, $p_1 = 0,2$, $A_2 = 10^{1,4}$, $p_2 = 0,0001$, $A_3 = 10^{1,8}$, $p_3 = 0,000003$.

Expressando-se \mathcal{I} e \mathcal{N} em dB[W/MHz], as restrições em (2-15) se escrevem

$$P(i > 10 \log A_j + N) < p_j \quad j = 1, \dots, m \quad (2-16)$$

onde $i = 10 \log \mathcal{I}$ e $N = 10 \log \mathcal{N}$.

As restrições no caso particular da Rec. ITU-R F.1495 são ilustradas na Figura 2.4, onde uma distribuição cumulativa de probabilidade da densidade de potência da interferência i calculada considerando-se uma dada distância d é também apresentada. Note que na situação ilustrada na Figura 2.4 a distribuição cumulativa de probabilidade da interferência produzida pela estação terrena no receptor FS satisfaz o critério de proteção da Rec. ITU-R F.1495.

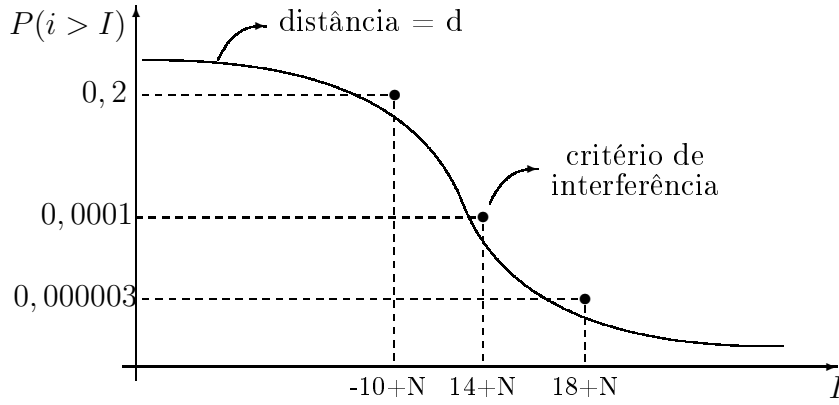


Figura 2.4: Ilustração de uma função distribuição cumulativa de probabilidade da interferência e critérios de interferência.

Considerando-se (2-1), o critério em (2-16) se escreve

$$P(P_t + G_t(\theta) + G_r - \ell > 10 \log A_j + N) < p_j, \quad j = 1, \dots, m \quad (2-17)$$

ou ainda

$$P(\ell < P_t + G_t(\theta) + G_r - 10 \log A_j - N) < p_j, \quad j = 1, \dots, m. \quad (2-18)$$

Salienta-se que, neste trabalho, a distância de coordenação foi obtida por meio da análise da função distribuição de probabilidade da perda de propagação, tendo sido utilizado o critério em (2-18). Esse critério, considerando-se que ℓ é uma variável aleatória contínua, pode ainda ser escrito como

$$P(\ell \leq L_j) < p_j \quad (2-19)$$

onde $L_j = P_t + G_t(\theta) + G_r - 10 \log A_j - N$.

Em analogia à Figura 2.4, a Figura 2.5 ilustra um exemplo baseado no critério da Rec. ITU-R F.1495, onde uma função distribuição de probabilidade da perda de propagação ℓ , calculada para uma dada distância d , satisfaz ao critério (pontos negros na Figura 2.5).

2.2

Caso não-geoestacionário

No início deste capítulo, foram estabelecidos os conceitos e o modelo matemático aplicáveis ao caso da interferência produzida em um receptor FS pela emissão de uma estação terrena na direção de um satélite geoestacionário. Nesta seção, este modelo será estendido ao caso da interferência produzida em

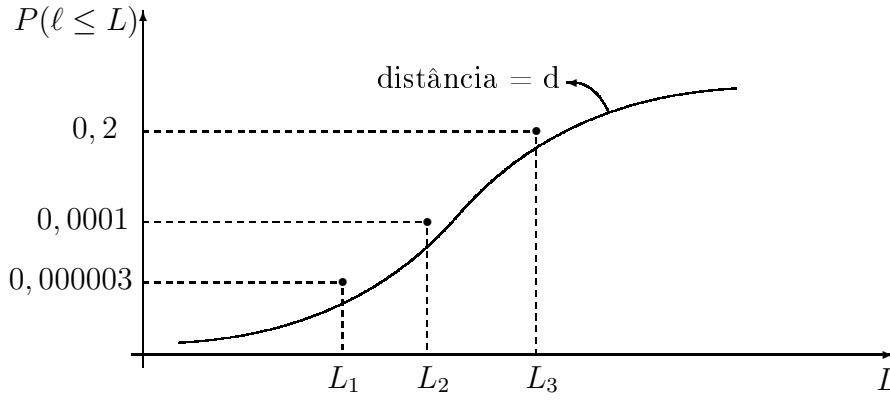


Figura 2.5: Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da perda de propagação associada ao limite L_p .

um receptor FS pela emissão de uma estação terrena que utiliza satélites não-geoestacionários.

Observe que no caso da estação terrena estar utilizando um satélite geoestacionário, a única variável aleatória em (2-1) é a perda por propagação ℓ . No caso de um satélite não-geoestacionário, devido à variação de apontamento da estação terrena transmissora (pois a posição do satélite é variável), o ganho da antena da estação terrena na direção do receptor FS é também uma variável aleatória, se considerarmos como aleatória a posição do satélite não-geoestacionário. Mais especificamente, o ângulo entre o enlace de comunicação estação terrena-satélite e a direção do receptor FS é uma variável aleatória e, conseqüentemente, o ganho da antena da estação terrena nesta direção é também uma variável aleatória.

Neste caso, o ganho $G_t(\theta)$ que aparece em (2-1) é modelado por uma variável aleatória g_t . Tem-se assim

$$i = P_t + g_t + G_r - \ell \quad (2-20)$$

ou ainda

$$i = P_t + G_r - x \quad (2-21)$$

onde

$$x = \ell - g_t \quad (2-22)$$

Note que a função distribuição de probabilidade da variável aleatória x pode ser obtida a partir da função distribuição de probabilidade da perda ℓ e da função densidade de probabilidade do ganho g_t . Com efeito, considerando-se ℓ e g_t variáveis aleatórias estatisticamente independentes, tem-se [6]

$$p_x(X) = p_\ell(X) * p_{-g_t}(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{-g_t}(\alpha) p_\ell(X - \alpha) d\alpha \quad (2-23)$$

Considerando-se (2-23), a função distribuição de probabilidade da variável aleatória x , definida como

$$F_x(X) = P(x \leq X) \quad (2-24)$$

pode ser expressa por

$$F_x(X) = \int_{-\infty}^X p_x(\beta) d\beta = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^X p_{-g_t}(\alpha) p_{\ell}(\beta - \alpha) d\alpha d\beta \quad (2-25)$$

ou ainda,

$$F_x(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{-g_t}(\alpha) \int_{-\infty}^X p_{\ell}(\beta - \alpha) d\beta d\alpha \quad (2-26)$$

A mudança de variável $\beta - \alpha = \gamma$ na integral interna permite escrever

$$F_x(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{-g_t}(\alpha) \int_{-\infty}^{X-\alpha} p_{\ell}(\gamma) d\gamma d\alpha \quad (2-27)$$

ou ainda, lembrando-se que

$$F_{\ell}(X - \alpha) = \int_{-\infty}^{X-\alpha} p_{\ell}(\gamma) d\gamma \quad (2-28)$$

obtem-se

$$F_x(X) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{-g_t}(\alpha) F_{\ell}(X - \alpha) d\alpha \quad (2-29)$$

ou seja,

$$F_x(X) = p_{-g_t}(X) * F_{\ell}(X). \quad (2-30)$$

Considerando que $p_{-g_t}(X) = p_{g_t}(-X)$, obtém-se finalmente a relação

$$F_x(X) = p_{g_t}(-X) * F_{\ell}(X). \quad (2-31)$$

Em (2-31), a função $F_{\ell}(X)$ é obtida, como no caso de satélites geoestacionários, utilizando-se o modelo matemático presente no Anexo 1 do Apêndice 7 do Regulamento de Radiocomunicações da UIT. A função $p_{g_t}(X)$ pode ser obtida por dois meios: pelo Método Analítico [5] ou pela simulação do movimento orbital do satélite. O Método Analítico é um método muito preciso, utilizado, em geral, quando os cálculos envolvem probabilidades menores que 10^{-6} . A simulação do movimento orbital possui implementação mais simples, sendo mais indicada para cálculos que não envolvam probabilidades extremamente pequenas.

Observe ainda que, em (2-21), sendo x modelada por uma variável aleatória, a densidade de potência interferente i que atinge o receptor FS será

também uma variável aleatória, e sua função distribuição de probabilidade pode ser determinada a partir da função distribuição de probabilidade da variável aleatória x . Com efeito, tem-se

$$\begin{aligned}
 F_i(I) &= P(i \leq I) \\
 &= P(P_t + G_r - x \leq I) \\
 &= P(x \geq P_t + G_r - I) \\
 &= 1 - F_x(P_t + G_r - I)
 \end{aligned} \tag{2-32}$$

A condição em (2-8), que define a distância de coordenação pode então ser, neste caso, escrita como

$$P(i > I_p) = 1 - F_i(I_p) = F_x(P_t + G_r - I_p) = p \tag{2-33}$$

ou, alternativamente,

$$P(x \leq X_p) = p \tag{2-34}$$

com

$$X_p = P_t + G_r - I_p. \tag{2-35}$$

Observe que, sendo d_p a distância de coordenação,

$$\begin{cases} \text{se } d < d_p, & \text{tem-se } P(x \leq X_p) > p \\ \text{se } d = d_p, & \text{tem-se } P(x \leq X_p) = p \\ \text{se } d > d_p, & \text{tem-se } P(x \leq X_p) < p \end{cases} \tag{2-36}$$

Note que, conforme ilustrado na Figura 2.6, a função distribuição de probabilidade da variável aleatória x desloca-se para direita à medida em que a distância entre a estação terrena e o receptor FS aumenta, ou seja, aumentando-se a distância d , a probabilidade da variável aleatória x ser menor ou igual a X_p diminui. Assim, a distância de coordenação d_p pode ser determinada aumentando-se a distancia d na Figura 2.6 até que a condição (2-34) seja satisfeita.

Considerando-se (2-21), critérios do tipo definido em (2-15) ou (2-16) como, por exemplo, aqueles da Rec. ITU-R F.1495, são expressos como

$$P(P_t + G_r - x > 10 \log A_j + N) < p_j \quad j = 1, \dots, m \tag{2-37}$$

ou ainda,

$$P(x \leq X_j) < p_j \quad j = 1, \dots, m \tag{2-38}$$

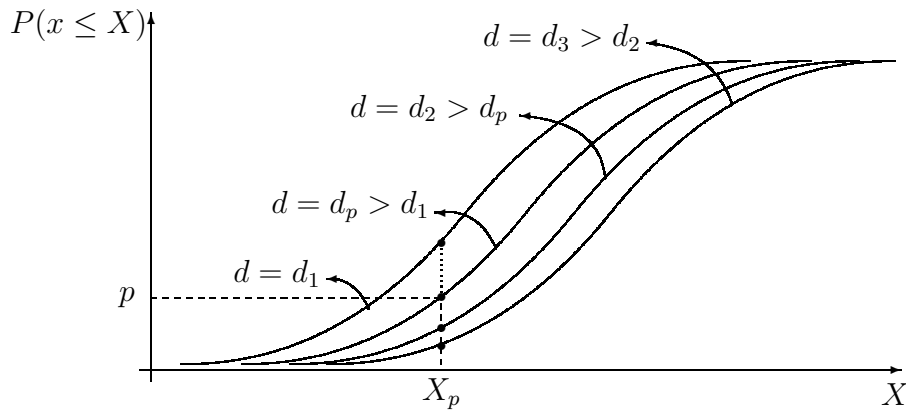


Figura 2.6: Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da variável aleatória x .

onde $X_j = P_t + G_r - 10 \log A_j - N$.

No caso de satélites não-geoestacionários, a distância de coordenação pode então ser obtida por meio de uma análise da função distribuição de probabilidade da variável aleatória x e do critério em (2-38). Em analogia à Figura 2.5, a Figura 2.7 ilustra um exemplo, baseado na Rec. ITU-R F.1495, onde a função distribuição de probabilidade da variável aleatória x , calculada a partir de (2-30) para uma dada distância d , satisfaz ao critério (pontos negros na Figura 2.7).

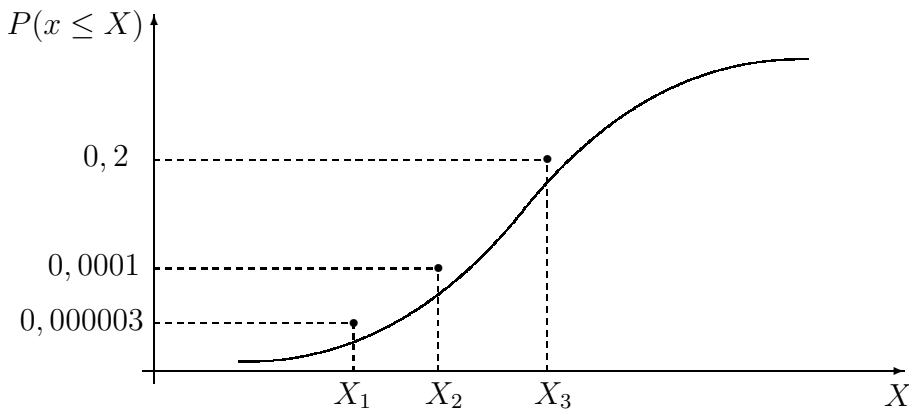


Figura 2.7: Ilustração de uma função distribuição de probabilidade da variável x associada ao limite X_j satisfazendo ao critério da Rec. ITU-R F.1495.

3

Resultados numéricos

Neste capítulo, o modelo matemático desenvolvido no Capítulo 2 é aplicado a situações específicas envolvendo a interferência produzida por estações terrenas de pequeno porte, operando com satélites não-geoestacionários e na faixa de 28 GHz, em receptores do Serviço Fixo Terrestre. São considerados três cenários, associados, respectivamente, a duas constelações de satélites de órbita baixa e uma de órbita média.

As constelações de satélites de órbita baixa, conhecidas, do inglês, como *Low Earth Orbit* (LEO), são constelações cujas alturas em relação à superfície terrestre são da ordem de 1.000 km. As constelações de órbita média, conhecidas, do inglês, como *Medium Earth Orbit* (MEO), são constelações cujas alturas são da ordem de 10.000 km. Os resultados correspondentes a cada um destes cenários são apresentados nas seções 3.1, 3.2 e 3.3.

3.1

Cenário 1: constelação LEO-1

Um ponto importante a ser considerado no cálculo da área de coordenação é o sistema de satélites com o qual a estação terrena estabelecerá comunicação. Nesta seção é apresentado um cenário envolvendo a interferência produzida pela comunicação entre uma estação terrena e satélites de uma constelação LEO em um receptor FS. Conforme já mencionado, a escolha deste tipo de constelação justifica-se no propósito deste estudo, pois destinando-se a estudar um serviço de comunicação via satélite ubiquamente distribuído onde uma estação terrena tem tamanho e potência restritos, uma órbita LEO torna possível o estabelecimento do enlace entre a estação terrena de pequeno porte e um satélite da constelação.

A constelação LEO considerada neste primeiro cenário, aqui denominada LEO-1, tem características orbitais análogas às do sistema Global Star. Estas características são apresentadas na Tabela 3.1. A Figura 3.1 ilustra, parcialmente, as trilhas dos 48 satélites da constelação LEO-1.

Tabela 3.1: Dados da constelação LEO-1.

Parâmetros Orbitais	
número de satélites	48
número de planos	6
número de satélites por plano	8
inclinação do plano orbital [graus]	52
excentricidade da órbita [graus]	0
altura orbital [km]	1.414

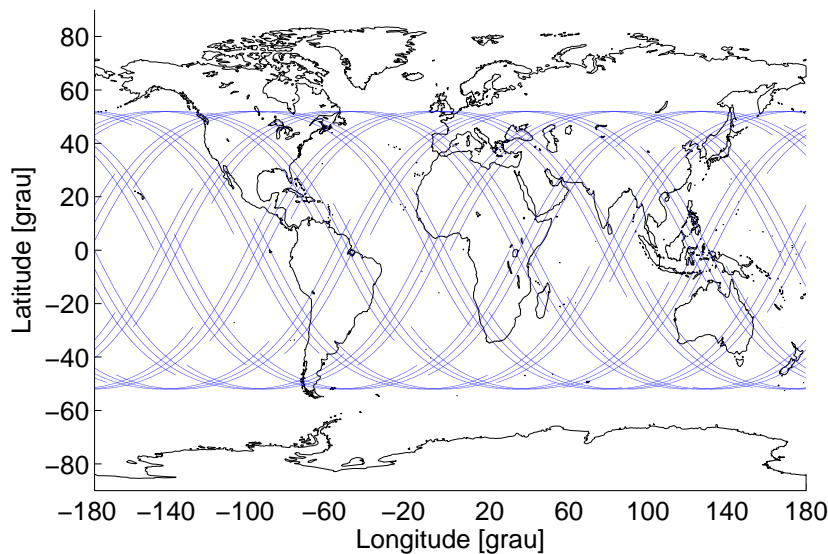


Figura 3.1: Ilustração das trilhas da constelação LEO-1.

Para o estabelecimento de um enlace de comunicação entre a estação terrena e um dos satélites da constelação (dentre os possíveis satélites visíveis à estação terrena) foram utilizadas duas premissas: a primeira diz respeito ao ângulo de elevação da estação terrena e a segunda diz respeito à regra de escolha do satélite com o qual um enlace de comunicação será estabelecido. Neste trabalho, um ângulo de elevação mínimo de 15° foi considerado. Isto equivale a dizer que qualquer satélite visto pela estação terrena com um ângulo de elevação superior à 15° é elegível a estabelecer um enlace de comunicação com a estação terrena.

No que tange à regra de escolha do satélite com o qual a estação terrena estabelecerá um enlace, considerou-se que todos os satélites da constelação vistos pela estação terrena com um ângulo de elevação superior a 15° têm iguais probabilidades de serem escolhidos.

Para o receptor do Serviço Fixo Terrestre, foram utilizados os parâmetros da Tabela 3.2, considerados típicos em um enlace FS na faixa de 28 GHz.

Tabela 3.2: Dados do receptor FS.

frequência [GHz]	28
ganho máximo da antena receptora [dBi]	48
ângulo de elevação da antena [graus]	0
feeder loss [dB]	0
densidade do ruído [dB[W/MHz]]	-140

Para a estação terrena, foram utilizados os parâmetros da Tabela 3.3, considerados típicos para terminais de pequeno porte.

Tabela 3.3: Dados da estação terrena LEO-1.

frequência [GHz]	28
diâmetro da antena da estação terrena [m]	1,5
ganho máximo da antena transmissora [dBi]	56,3
densidade de potência da estação transmissora [dB[W/MHz]]	-24,09

O diagrama de radiação utilizado para a antena transmissora da estação terrena interferente é baseado nas recomendações ITU-R F.1245-1 [7] e ITU-R S.465-6 [8]. Estas recomendações abordam diagramas de radiação que devem ser utilizados em estudos de coordenação e avaliação de interferência aplicáveis à sistemas FSS (Fixed-Sattelite Service) e FS. O diagrama de radiação utilizado é dado por

$$G_t(\theta) = \begin{cases} G_{max} - 2.5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\theta\right)^2 & ; \quad 0^\circ < \theta < \theta_1 \\ G_1 & ; \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \\ 32 - 25 \cdot \log \theta & ; \quad \theta_2 < \theta < 48^\circ \\ -10 & ; \quad 48^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \end{cases} \quad (3-1)$$

onde G_{max} é o ganho máximo da antena (em dBi), D é o diâmetro da antena (em metros), λ é comprimento de onda (em metros) e G_1 é o ganho do primeiro lóbulo lateral (em dBi), dado por $G_1 = 2 + 15 \cdot \log(D/\lambda)$. Ainda em (3-1), θ_1 e θ_2 são dados por

$$\theta_1 = \frac{20\lambda}{D} \sqrt{G_{max} - G_1} \quad (3-2)$$

e

$$\theta_2 = 10^{\frac{32-G_1}{25}}. \quad (3-3)$$

Os parâmetros G_{max} e D foram escolhidos levando-se em consideração as características típicas em um sistema HDFSS operando em 28 GHz. A Figura 3.2 mostra o diagrama de radiação em (3-1) para $G_{max} = 56,3$ dBi

e $D = 1,5$ m. Este diagrama foi utilizado para obtenção da função densidade de probabilidade do ganho da estação terrena na direção do receptor FS, calculada para os 360° no entorno da estação terrena. Esta função densidade de probabilidade é obtida a partir da função densidade de probabilidade da variável aleatória θ (ver Figura 3.3) e do diagrama de radiação em (3-1), sendo dada por [6]

$$\begin{aligned}
 p_{gt}(G) = & \delta(G - G_1) P(\theta \in \mathbf{I}_{[\theta_1, \theta_2]}) + \\
 & \delta(G + 10) P(\theta \in \mathbf{I}_{[48^\circ, 180^\circ]}) + \\
 & \left. \frac{p_\theta(\Theta)}{\left| -5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \Theta \right|} \right|_{\Theta = \sqrt{\frac{G_{max} - G}{2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2}}} \mathbb{I}_{(0, \theta_1)}(G) + \\
 & \left. \frac{p_\theta(\Theta)}{\left| \frac{-25}{\Theta \ln 10} \right|} \right|_{\Theta = 10^{\frac{32-G}{25}}} \mathbb{I}_{(\theta_2, 48^\circ)}(G)
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

ou ainda,

$$\begin{aligned}
 p_{gt}(G) = & \delta(G - G_1) (F_\theta(\Theta_2) - F_\theta(\Theta_1)) + \\
 & \delta(G + 10) (F_\theta(180^\circ) - F_\theta(48^\circ)) + \\
 & \left. \frac{\frac{d}{d\Theta} F_\theta(\Theta)}{\left| -5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2 \Theta \right|} \right|_{\Theta = \sqrt{\frac{G_{max} - G}{2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{D}{\lambda}\right)^2}}} \mathbb{I}_{(0, \theta_1)}(G) + \\
 & \left. \frac{\frac{d}{d\Theta} F_\theta(\Theta)}{\left| \frac{-25}{\Theta \ln 10} \right|} \right|_{\Theta = 10^{\frac{32-G}{25}}} \mathbb{I}_{(\theta_2, 48^\circ)}(G)
 \end{aligned} \tag{3-5}$$

Em (3-4) e (3-5), $\mathbb{I}_A(X)$ corresponde à função indicadora do conjunto A , definida por

$$\mathbb{I}_A(X) = \begin{cases} 1 & \text{se } X \in A \\ 0 & \text{se } X \notin A \end{cases} \tag{3-6}$$

e $p_\theta(\Theta) = \frac{d}{d\Theta} F_\theta(\Theta)$. Note que g_t possui dois impulsos resultantes dos dois patamares do ganho ilustrados na Figura 3.2.

A função distribuição de probabilidade da variável aleatória θ pode ser determinada de duas maneiras: simulando-se o movimento orbital dos satélites da constelação ou utilizando-se o Método Analítico desenvolvido em [5]. Esse último método é indicado na análise de interferência que requerem valores de probabilidade extremamente baixos (ou, analogamente ao citado na Rec. ITU-R F.1495, interferência de curtíssimo prazo), na qual simulações

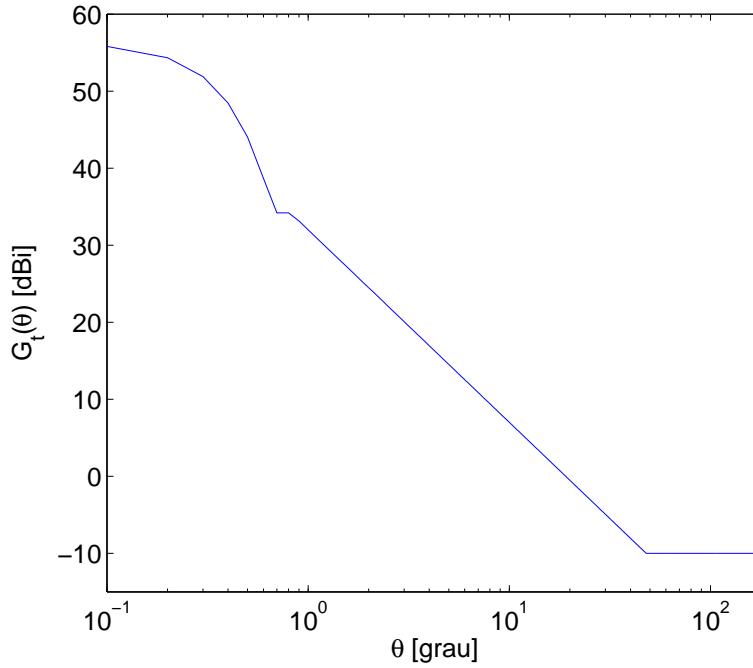


Figura 3.2: Diagrama de radiação da antenna da estação terrena.

requerem um tempo proibitivo. Geralmente, o Método Analítico é utilizado para probabilidades de interferência inferiores a 10^{-6} .

O procedimento apresentado no Anexo 1 do Apêndice 7 do Regulamento de Radiocomunicações, abordado com mais detalhes no Apêndice A, para a determinação da função distribuição de probabilidade $F_\ell(L)$, utiliza um modelo de propagação que é válido para probabilidades no intervalo $[1 \cdot 10^{-5}, 5 \cdot 10^{-1}]$. Assim, não há a necessidade de se obter a CDF da variável aleatória θ para valores de probabilidade inferiores a 10^{-6} . Por esse motivo, neste trabalho foi utilizado um procedimento de simulação do movimento orbital dos satélites da constelação na obtenção da CDF da variável aleatória θ . Para a determinação das distâncias de coordenação foi utilizado o critério de proteção em (2-16), com $m = 2$, $p_1 = 0,0001$ e $p_2 = 0,2$, $A_1 = 10^{1,4}$ e $A_2 = 10^{-1}$.

Para garantir que a CDF do ângulo θ seja confiável para valores de probabilidade da ordem de 10^{-5} , é preciso que o movimento orbital da constelação de satélites seja simulado por um tempo suficientemente longo. Desse modo, foi determinado por meio de diversos testes na simulação da constelação, que a simulação deveria considerar 735 períodos.

Adicionalmente ao número de períodos, é necessário estabelecer o passo (no tempo) em que são consideradas as posições dos satélites para o cálculo do ângulo θ . Este passo deve ser dimensionado de modo a evitar variações muito grandes do ângulo θ . Novamente, testes na simulação indicaram que um passo da ordem de 5 segundos já seria adequado.

Observou-se que, para uma estação terrena na direção de um dado azimuth em torno da posição do receptor FS, a função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ praticamente não se altera quando a distância entre o receptor FS e a estação terrena varia de 0 a 200 km. Este comportamento é ilustrado na Figura 3.3. Assim, como nas situações analisadas as distâncias de coordenação são menores que 200 km, utilizou-se a mesma função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ para todas as posições da estação terrena em uma dada direção de azimuth em torno da estação do receptor FS.

O comportamento ilustrado na Figura 3.3 foi obtido com base num receptor FS localizado em (62°S, 29,2°W). A partir desta posição foram calculadas as posições de estações terrenas distantes 0, 100 e 200 km nos azimuthes de 90°, 180° e 0° do receptor FS. Desta forma, para cada uma destas nove posições, foi calculada a CDF do ângulo θ para comparação de seu comportamento em função do azimuth e da distância.

Percebe-se nesta figura que para uma dada posição do receptor FS e um dado azimuth, a CDF do ângulo θ não apresenta variações significativas, podendo, portanto, ser considerada aproximadamente constante para estações terrenas distantes até 200 km do receptor FS. Adicionalmente, percebe-se que a CDF do ângulo θ varia para diferentes direções de azimuth, conforme ilustrado na figura, onde as linhas vermelhas representam o azimuth de 90°, as linhas pretas representam o azimuth de 180° e as linhas azuis representam o azimuth de 0°.

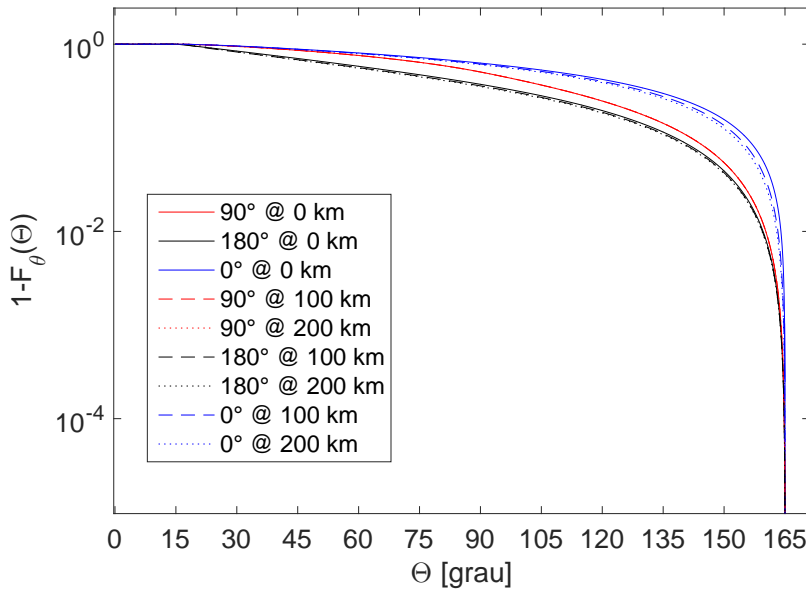


Figura 3.3: Comportamento da CDF do ângulo θ nas direções do azimuth de 90° (linha vermelha), 180° (linha preta) e 0° (linha azul) em torno de um receptor FS (62°S, 29,2°W) para estações terrenas distantes 0 (linha contínua), 100 (linha tracejada) e 200 km (linha pontilhada) do receptor FS.

A CDF do ângulo θ utilizada para estações terrenas ao longo do azimuth 30° , obtida para um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$, é apresentada na Figura 3.4.

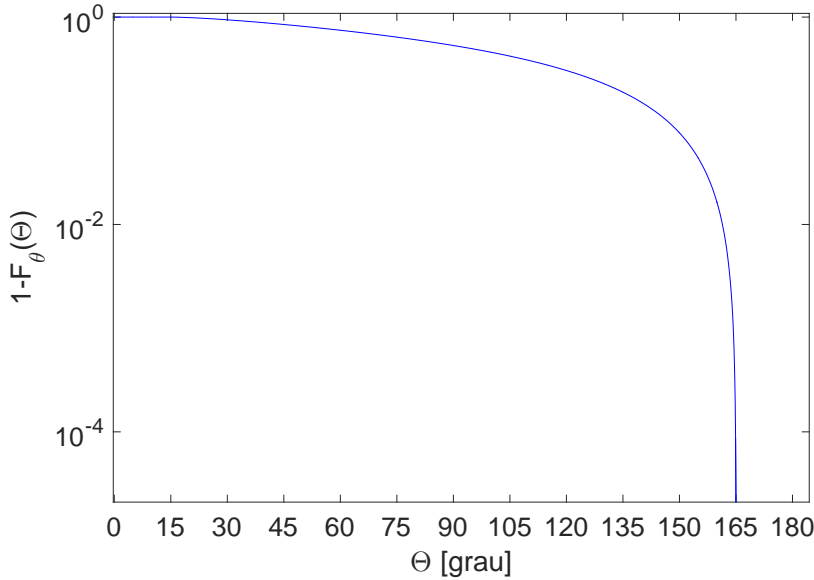


Figura 3.4: CDF do ângulo θ para estações terrenas no azimuth 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

A partir da função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ da variável aleatória θ , a função densidade de probabilidade do ganho g_t , da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS, foi determinada com base em (3-5). Esta função densidade de probabilidade é apresentada na Figura 3.5 para uma estação terrena localizada ao longo do azimuth 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

Estabelecidos os parâmetros do enlace satélite, as características da constelação de satélites, as características do receptor FS e o diagrama de radiação da antena da estação terrena, foram calculadas as distâncias de coordenação para todos os azimutes ao redor do receptor FS. Estas distâncias de coordenação foram determinadas como as menores distâncias para as quais a condição (2-38) é satisfeita.

Normalmente, esta variação da posição da estação terrena ao longo de um dado azimuth em torno do receptor FS impõe que o cálculo da função densidade de probabilidade do ganho g_t seja realizado a cada nova posição. Entretanto, conforme mencionado e ilustrado Figura 3.3, verificou-se que a CDF do ângulo θ e, conseqüentemente a função densidade de probabilidade do ganho g_t , praticamente não varia para distâncias de até 200 km.

A área de coordenação em torno de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$ foi determinada utilizando-se o modelo matemático desenvolvido no Capítulo 2. O resultado obtido é apresentado na Figura 3.6.

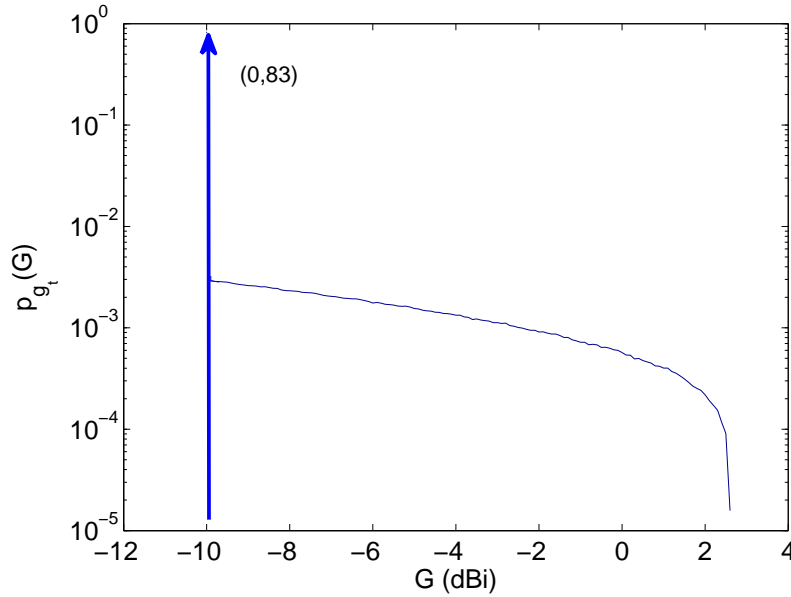


Figura 3.5: Função densidade de probabilidade do ganho g_t para uma estação terrena, comunicando com a constelação LEO-1, ao longo do azimuth 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

Nesta figura, o contorno arredondado de traço mais fino representa a distância de coordenação na qual o relevo não é considerado nos cálculos. Ou seja, o modelo matemático é utilizado sem considerar as alturas do perfil do percurso ao longo do receptor FS, o que implica em um resultado mais uniforme em todas as direções ao redor do receptor FS. Neste caso particular (sem relevo), o fator predominante no cálculo da distância de coordenação em cada azimuth no entorno do receptor FS é o comportamento da variável g_t .

Note também na Figura 3.6 que a distância de coordenação para o caso sem relevo, ao longo de todos os azimuths, possui forma semelhante à um círculo centrado no receptor FS. Isto acontece devido às características da constelação LEO em questão e do ganho da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS. A existência de um impulso de área 0,83, em -10 dBi, na função densidade de probabilidade do ganho g_t , faz com que este ganho torne-se predominante em todos os azimuths considerados, havendo, assim, pouca variação na perda necessária para garantir níveis adequados de interferência, em cada azimuth, o que causa o efeito observado.

Na Figura 3.6, os contornos de bordas mais grossas correspondem a áreas de coordenação determinadas considerando-se o relevo do terreno no entorno do receptor FS. Note que a inclusão do relevo na determinação da distância de coordenação causou uma forte diminuição da mesma em algumas direções. Isto se deve ao fato de que ao longo de uma dada direção, características do perfil do relevo como elevações (colinas, serras, montanhas, etc) podem ser

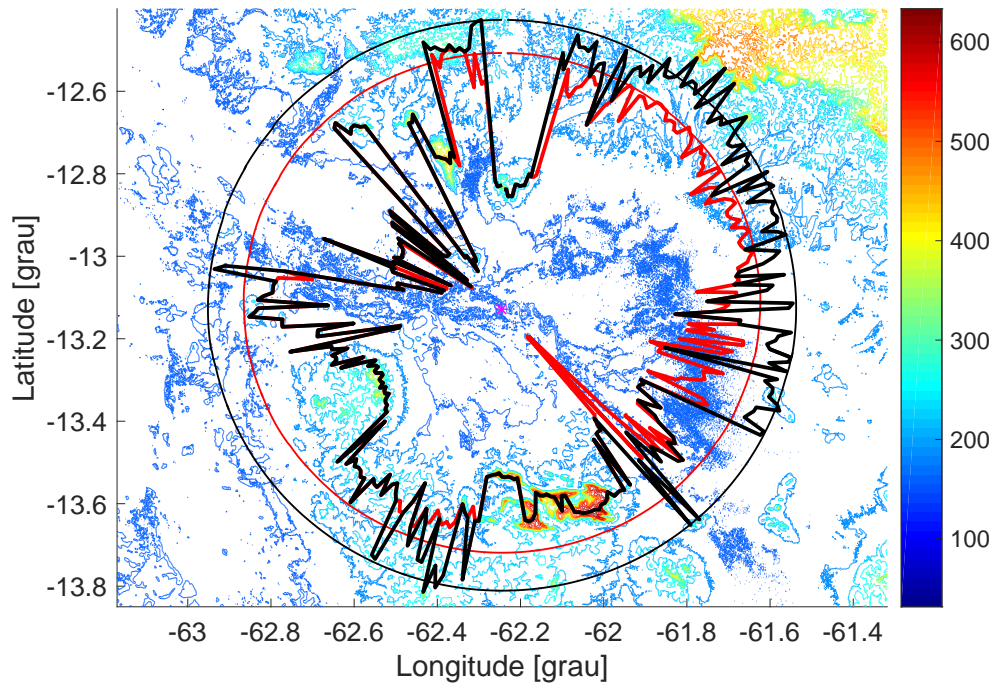


Figura 3.6: Área de coordenação de um receptor FS localizado em $(62,2444^{\circ}\text{W}, 13,1267^{\circ}\text{S})$ sob a influência da constelação LEO-1, considerando o relevo do entorno, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.

impactantes no resultado final.

Adicionalmente, a Figura 3.6 apresenta dois tipos de área de coordenação, representadas pelas cores vermelha e preta. Estas duas cores correspondem aos critérios de proteção utilizados para a determinação da distância de coordenação. O contorno de cor preta representa a área de coordenação obtida considerando-se (2-16) com $p_1 = 0,0001$ e $A_1 = 10^{1,4}$. O contorno de cor vermelha, representa a área de coordenação obtida considerando-se o critério (2-16) com $p_2 = 0,2$ e $A_2 = 10^{-1}$. Caso se deseje que os dois critérios de proteção ($p_1 = 0,0001$ e $p_2 = 0,2$) sejam simultaneamente atendidos, a área de coordenação será definida pela maior das distâncias de coordenação em cada azimute.

Na Figura 3.6 pode-se identificar pontos do relevo de maior altitude que também foram indicados como sendo os pontos para a distância de coordenação. Esta ilustração corrobora a conclusão de que nas direções onde a distância de coordenação foi menor do que a distância calculada na ausência de relevo, existem pontos do relevo que permitem a aproximação entre estação terrena e o receptor FS. Isto demonstra a importância de se considerar as condições do relevo no entorno do ponto que se deseja proteger.

O efeito do movimento dos satélites na área de coordenação pode ser observado comparando-se as figuras 3.6 e 3.7. Na Figura 3.7 foram determina-

dos os contornos de coordenação considerando uma situação hipotética, onde a estação terrena se comunica com um único satélite da constelação LEO-1, considerando, também, que o mesmo encontra-se parado nas coordenadas (77,59°W, 30,98°S).

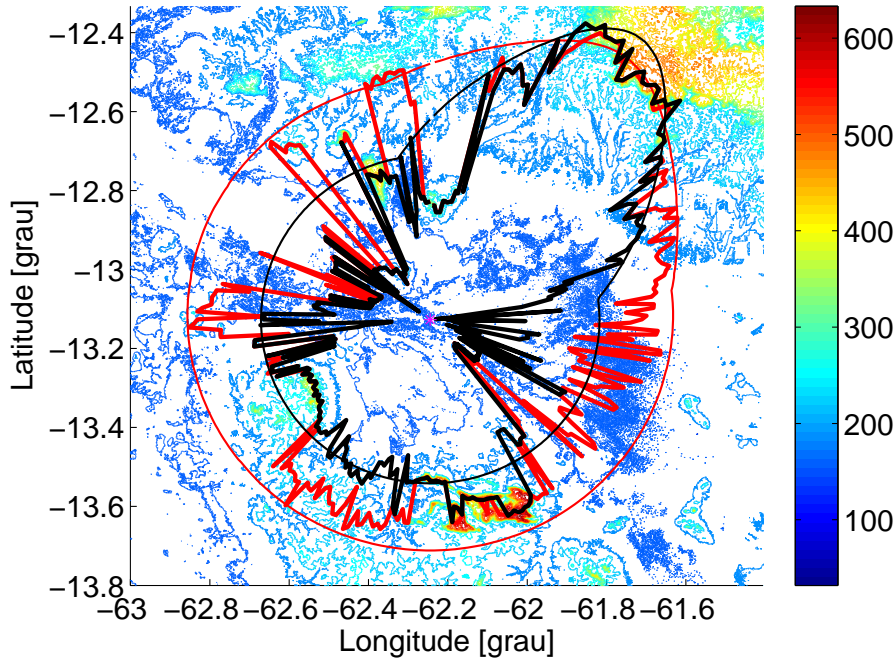


Figura 3.7: Área de coordenação de um receptor FS localizado em (62,2444°W, 13,1267°S) sob a influência de um único satélite da constelação LEO-1, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.

Como na Figura 3.6, o contorno arredondado de traço mais fino na Figura 3.7 representa a distância de coordenação na qual o relevo não é considerado nos cálculos. Note que devido à posição fixa do satélite, a área de coordenação possui um alongamento na direção oposta à do satélite. Isso ocorre no azimuth onde o receptor FS vê a antena da estação terrena de frente, o que implica em um ganho da antena transmissora da estação terrena maior nesta direção e, consequentemente, numa maior distância de coordenação.

O efeito do movimento dos satélites na área de coordenação pode ser melhor apreciado na Figura 3.8. Nesta figura estão ilustradas as áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ e $A_1 = 10^{1,4}$ e às situações satélite parado/satélite em movimento.

Note que na situação onde a estação terrena se encontra entre o satélite e o receptor FS, espera-se que a distância do receptor FS à borda da área de coordenação correspondente ao satélite parado (representada pela cor preta) seja menor do que a distância do receptor FS à borda da área de coordenação correspondente à constelação em movimento (representada pela cor vermelha).

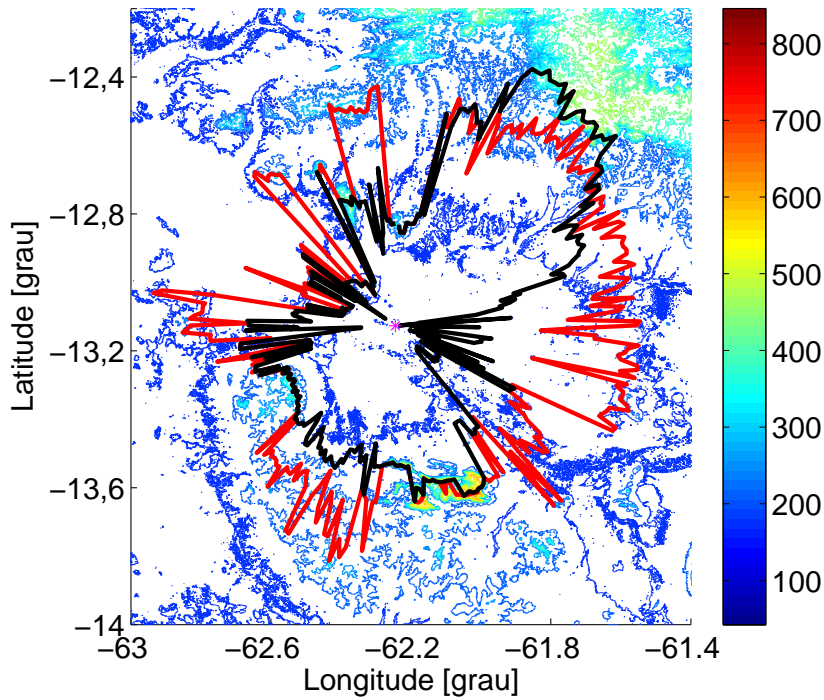


Figura 3.8: Comparação entre áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ obtidas sob a influência da comunicação com a constelação LEO-1 (representada pela cor vermelha) e com um satélite parado (representada pela cor preta), considerando o relevo no entorno do receptor FS.

Isto porque na comunicação da estação terrena com a constelação de satélites, o ganho da antena da estação terrena na direção do receptor FS pode assumir valores mais altos do que quando a comunicação é feita com um satélite parado. No entanto, devido às características do relevo no entorno do receptor esse efeito não pôde ser observado.

Na situação onde o receptor FS vê a antena da estação terrena de frente, observa-se que este efeito de maior ganho na direção do receptor FS resultou em uma maior distância de coordenação para o caso da comunicação com o satélite parado do que para o caso da comunicação com a constelação LEO-1. Note que nas proximidades da distância de coordenação desta situação, o relevo não apresenta alturas significativas em relação ao receptor FS, o que propiciou a diferença observada entre as distâncias de coordenação para o satélite parado e para a constelação LEO-1.

Uma vez observado o comportamento da interferência produzida pela comunicação de uma estação terrena com um satélite da constelação LEO-1 em um receptor FS e o efeito do relevo no resultado final da área de coordenação, procedeu-se a determinação do objeto de estudo desse trabalho, ou seja, da determinação de uma região de coordenação ao longo da fronteira de dois

países, um deles com um serviço HDFSS e o outro com um Serviço Fixo Terrestre na mesma faixa de frequências.

No exemplo apresentado foi considerada a fronteira entre o Brasil e a Bolívia, onde considerou-se a existência de FS na Bolívia e a implantação de HDFSS no Brasil. Para a determinação desta região de coordenação, considerou-se um conjunto de receptores FS com distribuição geográfica uniforme ao longo da fronteira entre os dois países. Foram considerados 28 receptores FS ao longo da fronteira entre o Brasil e a Bolívia (distância de 10 km entre

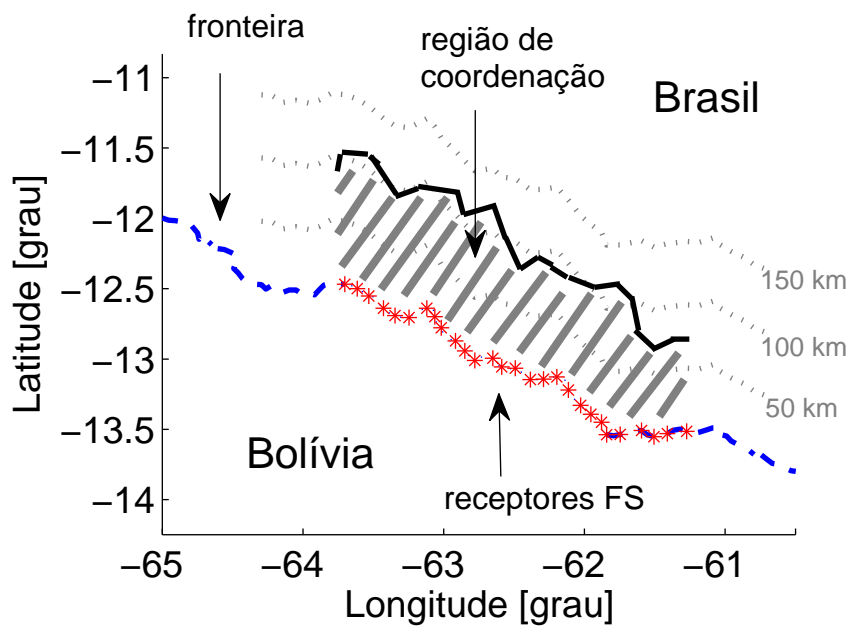


Figura 3.9: Região de coordenação, baseada na constelação LEO-1, na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.

A área de coordenação no entorno de cada receptor FS foi determinada com base na menor distância de coordenação que satisfaz aos dois critérios de proteção utilizados. Observe que a sobreposição destas áreas de coordenação forma uma borda de coordenação na fronteira entre os países.

Vale lembrar que fora da região de coordenação (ver Figura 3.9), estações terrenas operando num sistema HDFSS no Brasil, podem ser implantadas sem a necessidade de coordenação com o Serviço Fixo Terrestre do país vizinho (Bolívia).

3.2
Cenário 2: constelação LEO-2

Nesta seção é apresentado um cenário envolvendo a interferência produzida pela comunicação entre uma estação terrena e satélites de uma constelação LEO com parâmetros diferentes aos da constelação LEO apresentada na seção anterior. Esta seção destina-se a apresentar a aplicação do modelo matemático desenvolvido em uma constelação de órbita baixa com inclinação próxima a 90°(órbita polar).

A constelação LEO considerada neste cenário, aqui denominada LEO-2, possui características orbitais análogas às do sistema de satélites Teledesic. Estas características são apresentadas na Tabela 3.4. A Figura 3.10 ilustra, parcialmente, as trilhas dos 288 satélites da constelação LEO-2.

Tabela 3.4: Dados da constelação LEO-2.

Parâmetros Orbitais	
número de satélites	288
número de planos	12
número de satélites por plano	24
inclinação do plano orbital [graus]	84,7
excentricidade da órbita [graus]	0
altura orbital [km]	1.375

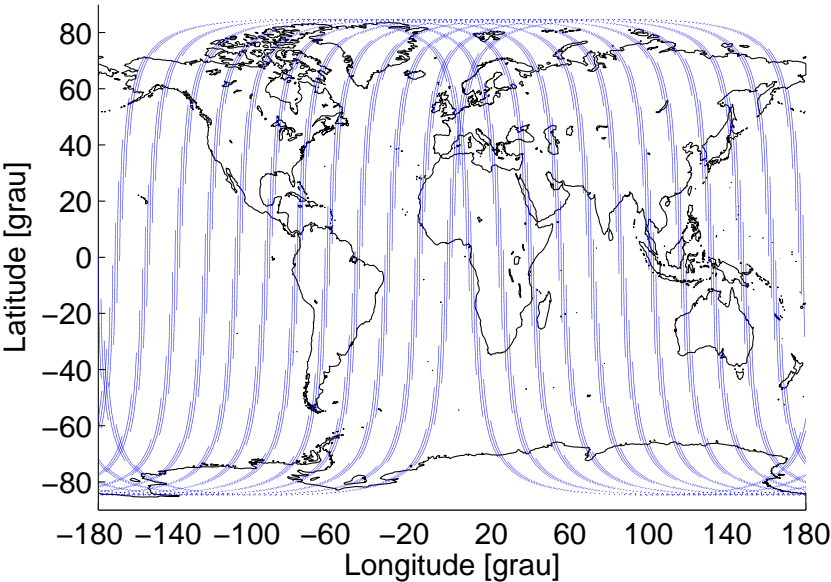


Figura 3.10: Ilustração das trilhas da constelação LEO-2.

Para o estabelecimento de um enlace de comunicação entre a estação terrena e um dos satélites da constelação LEO-2 (dentre os possíveis satélites

visíveis à estação terrena), foram consideradas as mesmas premissas utilizadas para o caso da constelação LEO-1 apresentadas na Seção 3.1. Assim, foi utilizado um ângulo de elevação mínimo de 15° e foi considerado que todos os satélites da constelação vistos pela estação terrena com um ângulo superior ao ângulo de elevação têm iguais probabilidades de serem escolhidos. Adicionalmente, para o receptor FS, foram utilizados os mesmos parâmetros apresentados na Tabela 3.2.

Para a antena transmissora da estação terrena foi considerado o mesmo diagrama de radiação apresentado na Tabela 3.3 e ilustrado na Figura 3.2. Entretanto, foi utilizada uma densidade de potência de transmissão diferente da utilizada para comunicação da estação terrena com a constelação LEO-1. Para este sistema foi considerada uma potência de transmissão de $-9,32$ dBW e uma largura de banda da portadora de $3,096$ MHz. As características da estação terrena para comunicação com a constelação LEO-2 são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Dados da estação terrena LEO-2.

frequência [GHz]	28
diâmetro da antena da estação terrena [m]	1,5
ganho máximo da antena transmissora [dBi]	56,3
densidade de potência da estação transmissora [dB[W/MHz]]	-14,23

Como na Seção 3.1, a função distribuição de probabilidade da variável aleatória θ , foi determinada utilizando-se o procedimento de simulação do movimento orbital dos satélites da constelação. Dessa forma, a CDF do ângulo θ foi obtida por meio de simulação onde foi considerado um tempo de simulação de 735 períodos e um passo de 5 segundos.

Assim como no caso da constelação LEO-1, a variação da função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ com a distância entre a estação terrena e o receptor FS foi também avaliada. Observou-se, conforme ilustrado na Figura 3.11, que a função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ para a constelação LEO-2 praticamente não se altera, dada uma direção de azimuth, quando a distância entre o receptor FS e a estação terrena varia de 0 a 200 km. Como nas situações analisadas as distâncias de coordenação são menores que 200 km, utilizou-se a mesma função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$, dada uma direção de azimuth, para todas as posições da estação terrena ao longo da estação do receptor FS.

O comportamento ilustrado na Figura 3.11 foi obtido com base num receptor FS localizado em $(62^\circ\text{S}, 62,3^\circ\text{E})$. A partir desta posição foram calculadas as posições de estações terrenas distantes 0, 100 e 200 km nos

azimutes de 90° , 180° e 0° do receptor FS. Desta forma, para cada uma destas nove posições, foi calculada a CDF do ângulo θ para comparação de seu comportamento em função do azimuth e da distância.

Percebe-se nesta figura que para uma dada posição do receptor FS e um dado azimuth, a CDF do ângulo θ não apresenta variações significativas, podendo, portanto, ser considerada aproximadamente constante para estações terrenas distantes até 200 km do receptor FS. Adicionalmente, percebe-se que a CDF do ângulo θ varia para diferentes direções de azimuth, conforme ilustrado na figura, onde as linhas vermelhas representam o azimuth de 90° , as linhas pretas representam o azimuth de 180° e as linhas azuis representam o azimuth de 0° .

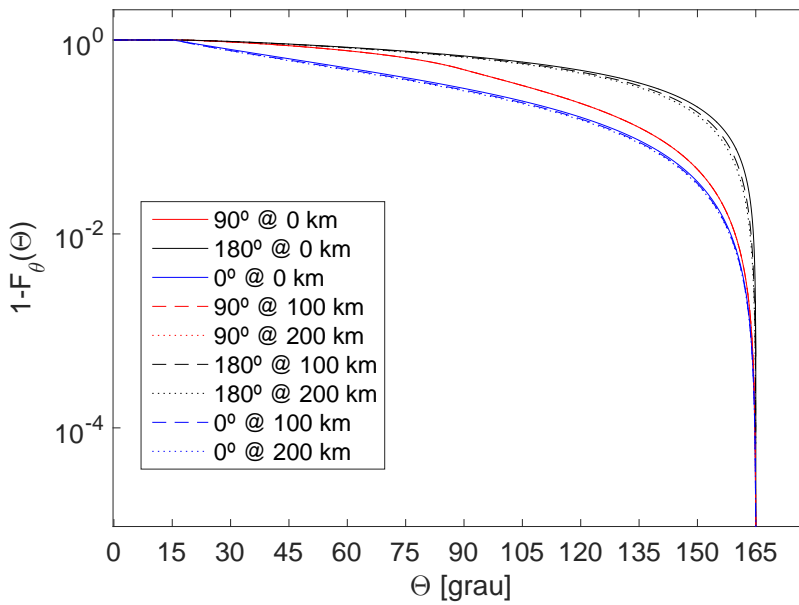


Figura 3.11: Comportamento da CDF do ângulo θ nas direções do azimuth de 90° (linha vermelha), 180° (linha preta) e 0° (linha azul) em torno de um receptor FS (62°S , $62,3^\circ\text{E}$) para estações terrenas distantes 0 (linha contínua), 100 (linha tracejada) e 200 km (linha pontilhada) do receptor FS.

A CDF do ângulo θ utilizada para estações terrenas ao longo do azimuth 30° , obtida para um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$), é apresentada na Figura 3.12.

A partir da função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ da variável aleatória θ , a função densidade de probabilidade do ganho g_t , da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS, foi determinada com base em (3-5). Esta função densidade de probabilidade é apresentada na Figura 3.13 para uma estação terrena localizada no azimuth 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).

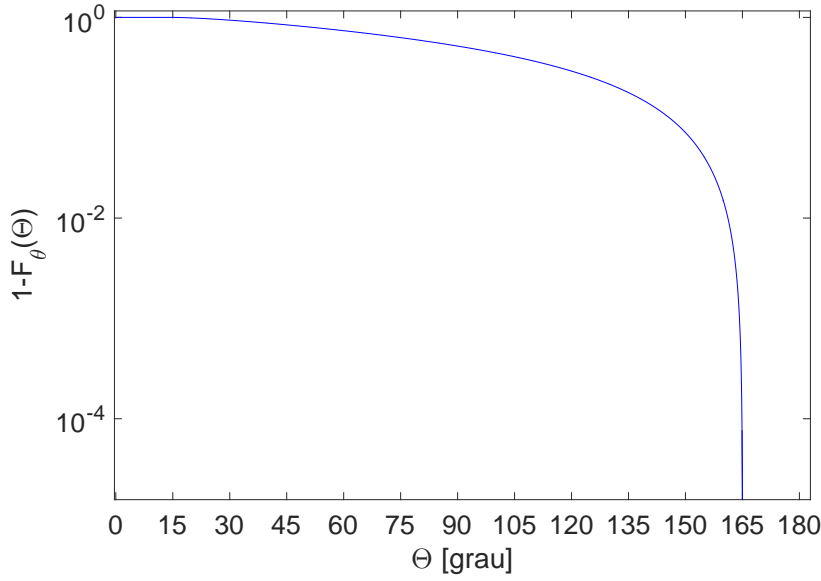


Figura 3.12: CDF do ângulo θ para estações terrenas no azimute 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

Estabelecidos os parâmetros de enlace, as características da constelação LEO-2, as características do receptor FS e o diagrama de radiação da antena da estação terrena, foram calculadas as distâncias de coordenação para todos os azimutes ao redor do receptor FS. Estas distâncias de coordenação foram determinadas como as menores distâncias para as quais a condição (2-38) é satisfeita. Como mencionado na Seção 3.1, esta variação da posição da estação terrena ao longo de um azimute em torno do receptor FS impõe que o cálculo da função densidade de probabilidade do ganho g_t seja realizado a cada nova posição. Contudo, verificou-se na Figura 3.11 que a CDF do ângulo θ e, conseqüentemente, a função densidade de probabilidade do ganho g_t , praticamente não varia para distâncias de até 200 km.

A área de coordenação em torno de um receptor FS, localizado nas mesmas coordenadas que as utilizadas na seção anterior, $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$, foi determinada utilizando-se o modelo matemático desenvolvido no Capítulo 2. As mesmas coordenadas foram consideradas no intuito de permitir que os cálculos estejam sujeitos às mesmas influências do ambiente no entorno das estações. O resultado obtido é apresentado na Figura 3.14.

A Figura 3.14 é semelhante à Figura 3.6, possuindo os contornos para as distâncias de coordenação considerando a situação com e sem relevo, onde o traço mais fino representa a distância de coordenação na qual o relevo não é considerado. Novamente, no caso particular onde o relevo não é considerado, o fator predominante no cálculo da distância de coordenação em cada azimute no entorno do receptor FS é o comportamento da variável g_t .

A distância de coordenação para o caso sem relevo, ao longo de todos os

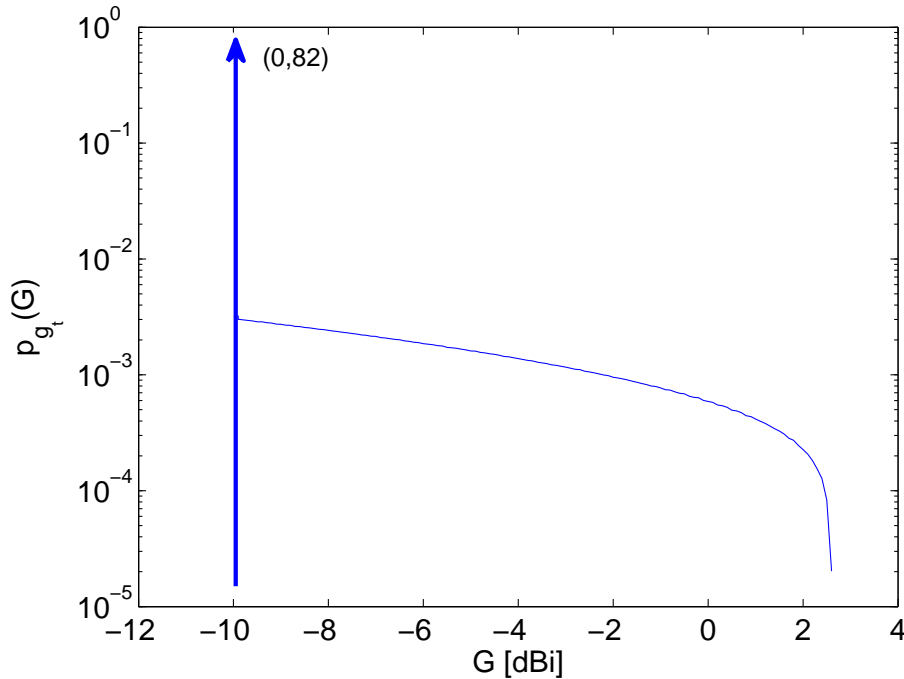


Figura 3.13: Função densidade de probabilidade do ganho g_t para uma estação terrena, comunicando com a constelação LEO-2, no azimuth 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

azimutes, possui forma semelhante a um círculo centrado no receptor FS. Isto acontece devido às características da constelação LEO-2 e do ganho da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS. A existência de um impulso de área 0,82, em -10 dBi, na função densidade de probabilidade do ganho g_t , faz com que este ganho torne-se predominante em todos os azimutes considerados, havendo, assim, pouca variação da perda necessária para garantir níveis adequados de interferência, em cada azimuth, o que causa o efeito observado.

Com relação às bordas mais grossas da Figura 3.14, estas foram obtidas considerando o efeito do relevo no entorno do receptor FS. Note que a inclusão do relevo na determinação da distância de coordenação causou novamente uma forte diminuição da mesma em algumas direções. Isto se deve ao fato de que ao longo de uma dada direção, características do perfil do relevo podem ser impactantes no resultado final.

Adicionalmente, a Figura 3.14 apresenta dois tipos de área de coordenação, representadas pelas cores vermelha e preta. Estas duas cores correspondem aos critérios de proteção utilizados para a determinação da distância de coordenação. O contorno de cor preta representa a área de coordenação obtida considerando-se $(2-16)$ com $p_1 = 0,0001$ e $A_1 = 10^{1,4}$. O contorno de cor vermelha representa a área de coordenação obtida considerando-se o critério

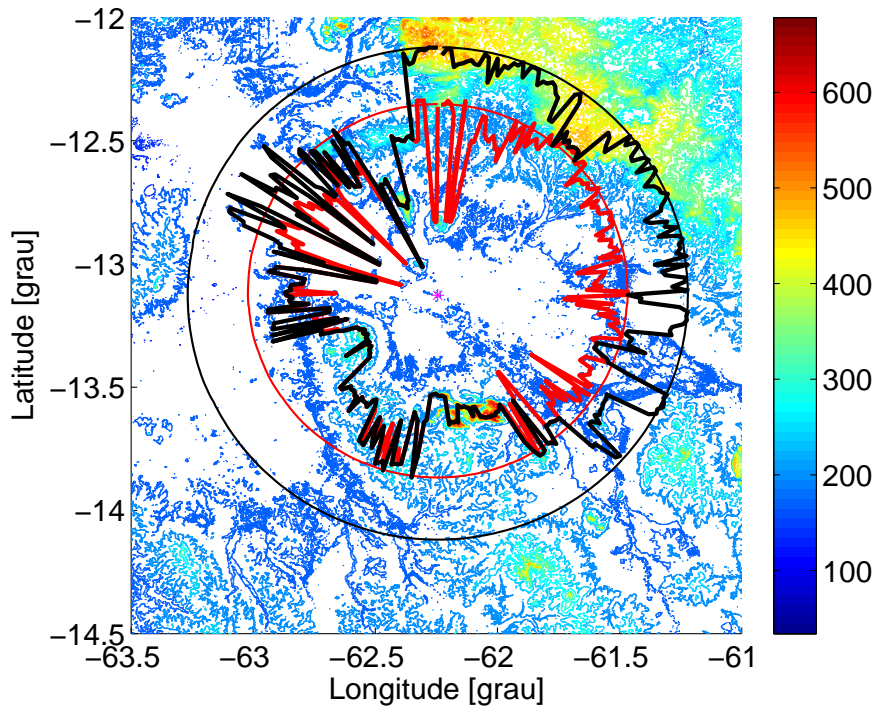


Figura 3.14: Área de coordenação de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$ sob a influência da constelação LEO-2, considerando o relevo do entorno, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.

(2-16) com $p_2 = 0,2$ e $A_2 = 10^{-1}$. Caso se deseje que os dois critérios de proteção ($p_1 = 0,0001$ e $p_2 = 0,2$) sejam simultaneamente atendidos, a área de coordenação será definida pela maior das distâncias de coordenação em cada azimuth.

Na Figura 3.14 pode-se identificar pontos do relevo de maior altitude que também foram indicados como sendo os pontos para a distância de coordenação. Esta ilustração corrobora a conclusão de que nas direções onde a distância de coordenação foi menor do que a distância calculada na ausência de relevo, existem pontos do relevo que permitem a aproximação entre a estação terrena e o receptor FS, demonstrando a importância de se considerar as condições do relevo no entorno do ponto que se deseja proteger.

O efeito do movimento dos satélites na área de coordenação pode ser observado comparando-se as figuras 3.14 e 3.15. Na Figura 3.15 foram determinados os contornos de coordenação considerando uma situação hipotética, onde a estação terrena se comunica com um único satélite da constelação LEO-2, considerando, também, que o mesmo encontra-se parado nas coordenadas $(75,70^\circ\text{W}, 31,71^\circ\text{S})$.

O contorno arredondado de traço mais fino na Figura 3.15 representa a

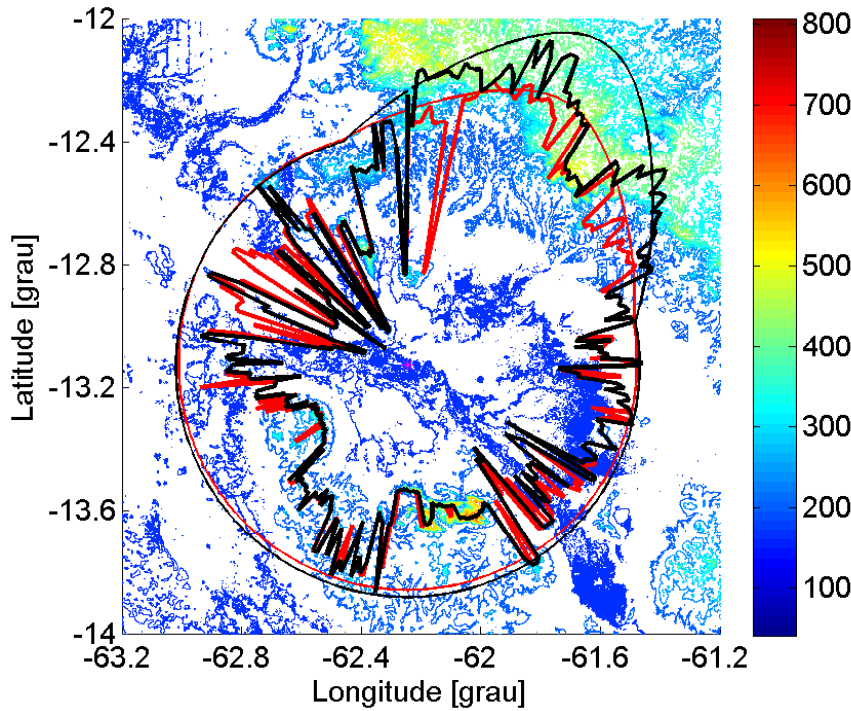


Figura 3.15: Área de coordenação de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$ sob a influência de um único satélite da constelação LEO-2, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.

distância de coordenação na qual o relevo não é considerado nos cálculos. Assim como no caso do satélite parado da constelação LEO-1, a área de coordenação possui um alongamento na direção oposta à do satélite. Isso ocorre no azimuth onde o receptor FS vê a antena da estação terrena de frente, implicando em um ganho da antena transmissora da estação terrena maior nesta direção e, conseqüentemente, numa maior distância de coordenação.

O efeito do movimento dos satélites na área de coordenação pode ser melhor apreciado na Figura 3.16. Nesta figura estão ilustradas as áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ e $A_1 = 10^{1,4}$ e às situações satélite parado (representada pela cor preta)/satélite em movimento (representada pela cor vermelha).

Note que, novamente, na situação onde a estação terrena se encontra entre o satélite e o receptor FS (região onde espera-se que a distância do receptor FS à borda da área de coordenação correspondente à constelação LEO-2 seja maior), a distância de coordenação correspondente à comunicação com um satélite parado e a distância de coordenação correspondente à constelação LEO-2 possuem o mesmo valor. Isto ocorre devido ao relevo presente no entorno do receptor FS e considerado nos cálculos para obtenção das distâncias, o qual

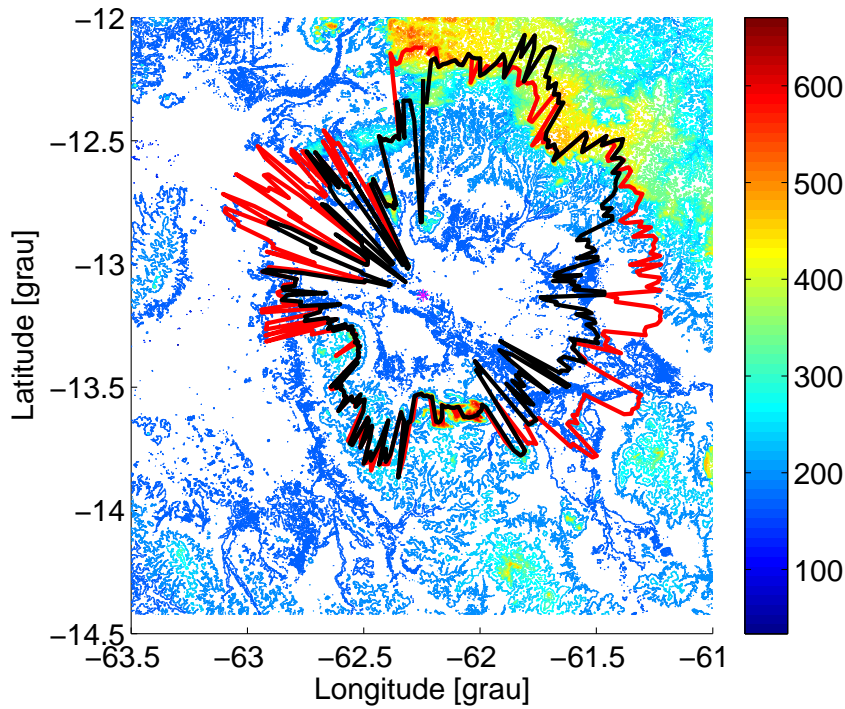


Figura 3.16: Comparação entre áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ obtidas para comunicação com a constelação LEO-2 (representada pela cor vermelha) e com um satélite parado (representada pela cor preta), considerando o relevo no entorno do receptor FS.

possibilita que ambas distâncias de coordenação aproximem-se do receptor FS.

Na situação onde receptor FS vê a antena da estação terrena de frente, observa-se que este efeito de maior ganho na direção do receptor FS resultou em uma maior distância de coordenação para o caso da comunicação com o satélite parado do que para o caso da comunicação com a constelação LEO-2. Note que nas proximidades da distância de coordenação desta situação, o relevo não apresenta alturas significativas em relação ao receptor FS, o que propiciou a diferença observada entre as distâncias de coordenação para o satélite parado e para a constelação LEO-2. Como no caso da Seção 3.1, o relevo mostrado na Figura 3.16 atinge alturas maiores em determinados pontos no entorno do receptor FS, evidenciando novamente sua influência no resultado da distância de coordenação.

Observado o comportamento da interferência produzida pela comunicação de uma estação terrena com um satélite da constelação LEO-2 em um receptor FS e o efeito do relevo no resultado final da área de coordenação, procedeu-se a determinação da região de coordenação na fronteira entre o Brasil e a Bolívia, considerando-se que a existência de FS na Bolívia e a implantação de HDFSS no Brasil compartilhando a mesma faixa de frequências.

Como anteriormente, para a determinação desta região de coordenação, considerou-se um conjunto de receptores FS com distribuição geográfica uniforme ao longo da fronteira entre os dois países. Foram considerados 28 receptores FS ao longo da fronteira entre o Brasil e a Bolívia, distantes 10 km um do

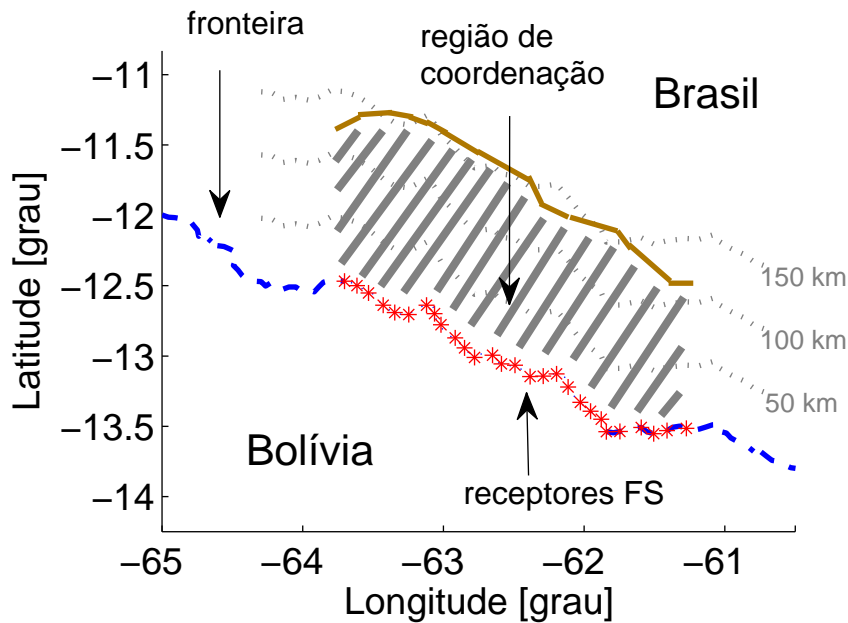


Figura 3.17: Região de coordenação, baseada na constelação LEO-2, na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.

A área de coordenação no entorno de cada receptor FS foi determinada com base na menor distância de coordenação que satisfaz aos dois critérios de proteção utilizados. Observe que a sobreposição destas áreas de coordenação forma uma borda de coordenação na fronteira entre os países. Fora da região de coordenação, estações terrenas operando num sistema HDFSS no Brasil podem ser implantadas sem a necessidade de coordenação com o Serviço Fixo Terrestre do país vizinho (Bolívia).

3.3

Cenário 3: constelação MEO

Nesta seção é apresentado um cenário envolvendo a interferência produzida pela comunicação entre uma estação terrena e satélites de uma constelação MEO em um receptor FS. Como mencionado anteriormente, esta seção destina-se a apresentar a aplicação do modelo matemático desenvolvido em uma constelação de órbita mais alta.

A constelação MEO considerada neste cenário possui características orbitais análogas às do sistema de satélites ICO. Estas características são apresentadas na Tabela 3.6. A Figura 3.18 ilustra, parcialmente, as trilhas dos 10 satélites da constelação MEO.

Tabela 3.6: Dados da constelação MEO.

Parâmetros Orbitais	
número de satélites	10
número de planos	2
número de satélites por plano	5
inclinação do plano orbital [graus]	45
excentricidade da órbita [graus]	0
altura orbital [km]	10.355

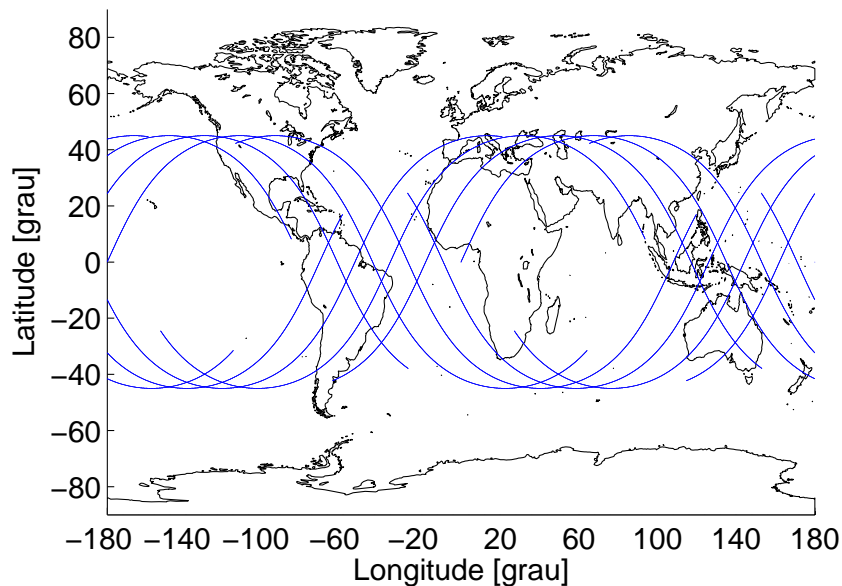


Figura 3.18: Ilustração das trilhas da constelação MEO.

Para o estabelecimento de um enlace de comunicação entre a estação terrena e um dos satélites da constelação MEO (dentre os possíveis satélites visíveis à estação terrena), foram consideradas as mesmas premissas utilizadas para o caso das constelações LEO-1 e LEO-2. Assim, foi utilizado um ângulo de elevação mínimo de 15° e foi considerado que todos os satélites da constelação vistos pela estação terrena com um ângulo superior ao ângulo de elevação têm iguais probabilidades de serem escolhidos. Em relação ao receptor FS, foram utilizados os mesmos parâmetros da Tabela 3.2.

Para a antena transmissora da estação terrena foi considerado o mesmo diagrama de radiação apresentado na Tabela 3.3 e ilustrado na Figura 3.2.

Nesta constelação, devido a altura da órbita ser maior que as das constelação LEO-1 e LEO-2, foi utilizada uma maior potência de transmissão para estação terrena, sendo de $-1,476$ dBW, e uma largura de banda da portadora de $2,628$ MHz. Dessa forma, as características da estação terrena para a constelação MEO são apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Dados da estação terrena MEO.

frequência [GHz]	28
diâmetro da antena da estação terrena [m]	1,5
ganho máximo da antena transmissora [dBi]	56,3
densidade de potência da estação transmissora [dB[W/MHz]]	-5,67

Como nas seções 3.1 e 3.2, a função distribuição de probabilidade da variável aleatória θ foi determinada utilizando-se o procedimento de simulação do movimento dos satélites da constelação. Dessa forma, a CDF do ângulo θ foi obtida por meio de simulação onde foi considerado um tempo de simulação de 735 períodos e um passo de 5 segundos.

Assim como no caso das constelações LEO-1 e LEO-2, a variação da função distribuição de probabilidade $F_{\theta}(\Theta)$ com a distância entre a estação terrena e o receptor FS foi também avaliada. Observou-se, conforme ilustrado na Figura 3.19, que a função distribuição de probabilidade $F_{\theta}(\Theta)$ para a constelação MEO praticamente não se altera, dada uma direção de azimuth, quando a distância entre o receptor FS e a estação terrena varia de 0 a 200 km. Como nas situações analisadas as distâncias de coordenação são menores que 200 km, utilizou-se a mesma função distribuição de probabilidade $F_{\theta}(\Theta)$, dada uma direção de azimuth, para todas as posições da estação terrena ao longo da estação do receptor FS.

O comportamento ilustrado na Figura 3.19 foi obtido com base num receptor FS localizado em $(62^{\circ}\text{S}, 8,41^{\circ}\text{W})$. A partir desta posição foram calculadas as posições de estações terrenas distantes 0, 100 e 200 km nos azimutes de 90° , 180° e 0° do receptor FS. Desta forma, para cada uma destas nove posições, foi calculada a CDF do ângulo θ para comparação de seu comportamento em função do azimuth e da distância.

Percebe-se nesta figura que para uma dada posição do receptor FS e um dado azimuth, a CDF do ângulo θ não apresenta variações significativas, podendo, portanto, ser considerada aproximadamente constante para estações terrenas distantes até 200 km do receptor FS. Adicionalmente, percebe-se que a CDF do ângulo θ varia para diferentes direções de azimuth, conforme ilustrado na figura, onde as linhas vermelhas representam o azimuth de 90° , as linhas

pretas representam o azimute de 180° e as linhas azuis representam o azimute de 0° .

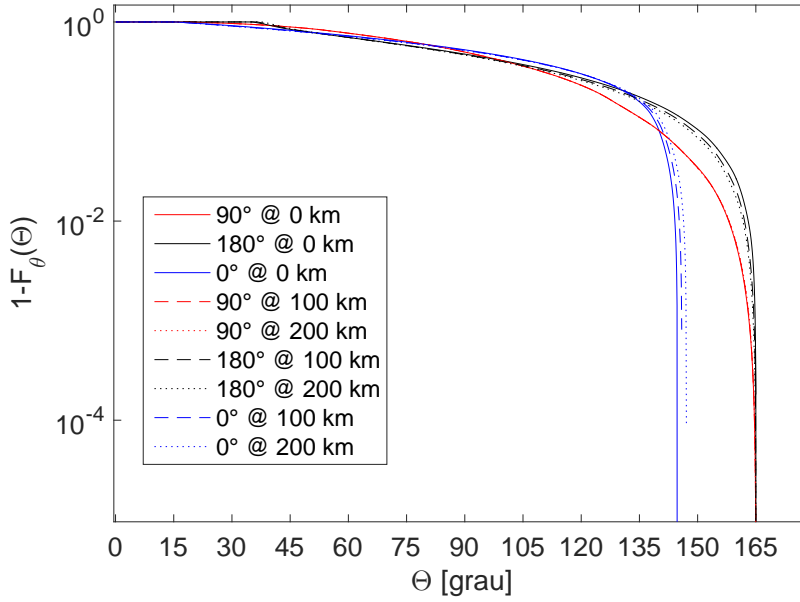


Figura 3.19: Comportamento da CDF do ângulo θ nas direções do azimute de 90° (linha vermelha), 180° (linha preta) e 0° (linha azul) em torno de um receptor FS (62°S , $8,41^\circ\text{W}$) para estações terrenas distantes 0 (linha contínua), 100 (linha tracejada) e 200 km (linha pontilhada) do receptor FS.

A CDF do ângulo θ utilizada para estações terrenas ao longo do azimute 30° , obtida para um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$), é apresentada na Figura 3.20.

A partir da função distribuição de probabilidade $F_\theta(\Theta)$ da variável aleatória θ , a função densidade de probabilidade do ganho g_t , da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS, foi determinada com base em (3-5). Esta função densidade de probabilidade é apresentada na Figura 3.21 para uma estação terrena localizada no azimute 30° de um receptor FS localizado em ($62,2444^\circ\text{W}$, $13,1267^\circ\text{S}$).

Estabelecidos os parâmetros de enlace, as características da constelação MEO, as características do receptor FS e o diagrama de radiação da antena da estação terrena, foram calculadas as distâncias de coordenação para todos os azimutes ao redor do receptor FS. Estas distâncias de coordenação foram determinadas como as menores distâncias para as quais a condição (2-38) é satisfeita. Como mencionado nas seções 3.1 e 3.2, esta variação da posição da estação terrena ao longo de um azimute em torno do receptor FS impõe que o cálculo da função densidade de probabilidade do ganho g_t seja realizado a cada nova posição. Entretanto, verificou-se na Figura 3.19 que a CDF do

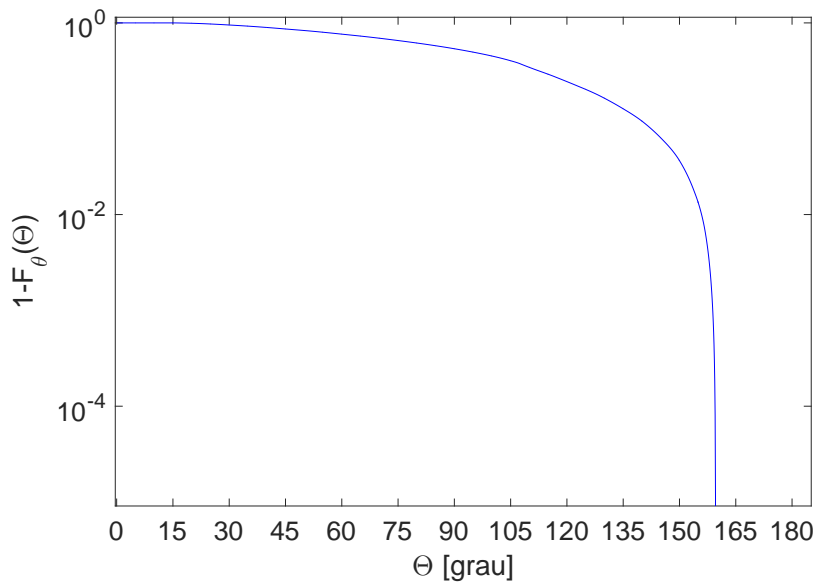


Figura 3.20: CDF do ângulo θ para estações terrenas no azimuth 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

ângulo θ e, conseqüentemente, a função densidade de probabilidade do ganho g_t , praticamente não varia para distâncias de até 200 km.

A área de coordenação em torno de um receptor FS, localizado nas mesmas coordenadas que as utilizadas nas seções anteriores, $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$, foi determinada utilizando-se o modelo matemático desenvolvido no Capítulo 2. As mesmas coordenadas foram consideradas no intuito de permitir que os cálculos estejam sujeitos às mesmas influências do ambiente no entorno das estações. O resultado obtido é apresentado na Figura 3.22.

A Figura 3.22 é semelhante às figuras 3.6 e 3.14, possuindo os contornos para a distâncias de coordenação considerando a situação com e sem relevo, onde o traço mais fino representa a distância de coordenação na qual o relevo não é considerado. Novamente, no caso particular onde o relevo não é considerado, o fator predominante no cálculo da distância de coordenação em cada azimuth no entorno do receptor FS é o comportamento da variável g_t . Note, porém, que a distância de coordenação de traço mais fino sofreu um achatamento, sendo este efeito devido às características orbitais da constelação MEO.

Com relação às bordas mais grossas da Figura 3.22, estas foram obtidas considerando o efeito do relevo no entorno do receptor FS. Note que a inclusão do relevo na determinação da distância de coordenação causou novamente uma forte diminuição da mesma em algumas direções.

Adicionalmente, a Figura 3.22 apresenta dois tipos de área de coordenação, representadas pelas cores vermelha e preta. Estas duas cores correspon-

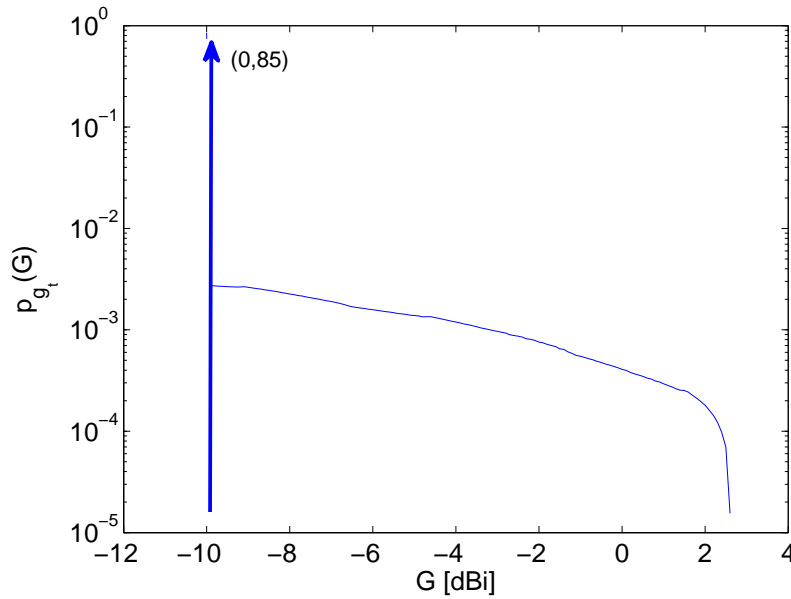


Figura 3.21: Função densidade de probabilidade do ganho g_t para uma estação terrena, comunicando com a constelação MEO, no azimuth 30° de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$.

dem aos critérios de proteção utilizados para a determinação da distância de coordenação. O contorno de cor preta representa a área de coordenação obtida considerando-se (2-16) com $p_1 = 0,0001$ e $A_1 = 10^{1,4}$. O contorno de cor vermelha representa a área de coordenação obtida considerando-se o critério (2-16) com $p_2 = 0,2$ e $A_2 = 10^{-1}$. Caso se deseje que os dois critérios de proteção ($p_1 = 0,0001$ e $p_2 = 0,2$) sejam simultaneamente atendidos, a área de coordenação será definida pela maior das distâncias de coordenação em cada azimuth.

Na Figura 3.22 pode-se identificar pontos do relevo de maior altitude que também foram indicados como sendo os pontos para a distância de coordenação. Novamente, esta ilustração corrobora a conclusão de que nas direções onde a distância de coordenação foi menor do que a distância calculada na ausência de relevo, existem pontos do relevo que permitem a aproximação entre a estação terrena e o receptor FS. Isto ressalta a importância de se considerar as condições do relevo no entorno do ponto que se deseja proteger.

O efeito do movimento dos satélites na área de coordenação pode ser observado comparando-se as figuras 3.22 e 3.23. Na Figura 3.23 foram determinados os contornos de coordenação considerando uma situação hipotética, onde a estação terrena se comunica com um único satélite da constelação MEO, considerando, também, que o mesmo encontra-se parado nas coordenadas $(111^\circ\text{W}, 44^\circ\text{S})$.

O contorno arredondado de traço mais fino na Figura 3.23 representa a

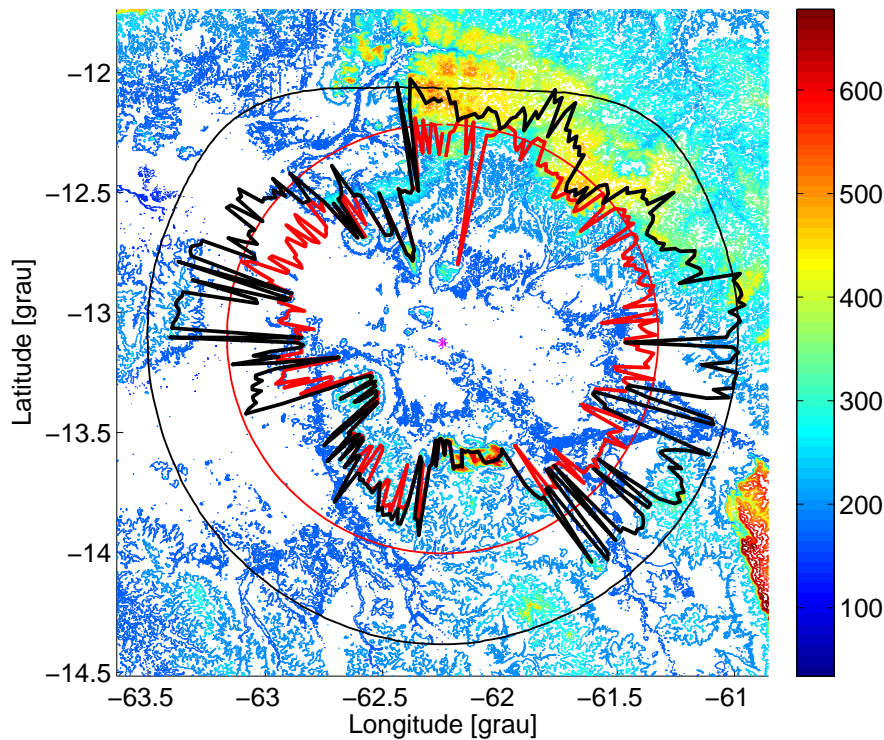


Figura 3.22: Área de coordenação de um receptor FS localizado em $(62,2444^\circ\text{W}, 13,1267^\circ\text{S})$ sob a influência da constelação MEO, considerando o relevo do entorno, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.

distância de coordenação na qual o relevo não é considerado nos cálculos. Assim como no caso do satélite parado das constelações LEO, a área de coordenação possui um alongamento na direção oposta à do satélite ocorrendo no azimuth quando o receptor FS vê a antena da estação terrena de frente. Observe que este alongamento da distância de coordenação é maior do que os apresentados nas mesmas figuras das constelações LEO-1 e LEO-2. Isto se deve à maior densidade de potência de transmissão utilizada pela estação terrena para estabelecimento de comunicação nesta constelação.

O efeito do movimento dos satélites na área de coordenação pode ser melhor apreciado na Figura 3.24. Nesta figura estão ilustradas as áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ e $A_1 = 10^{1,4}$ e às situações satélite parado (representado pela cor preta)/satélite em movimento (representado pela cor vermelha).

Note que, novamente, na situação onde a estação terrena se encontra entre o satélite e o receptor FS (região onde espera-se que a distância do receptor FS à borda da área de coordenação correspondente à constelação MEO seja maior), a distância de coordenação correspondente à comunicação

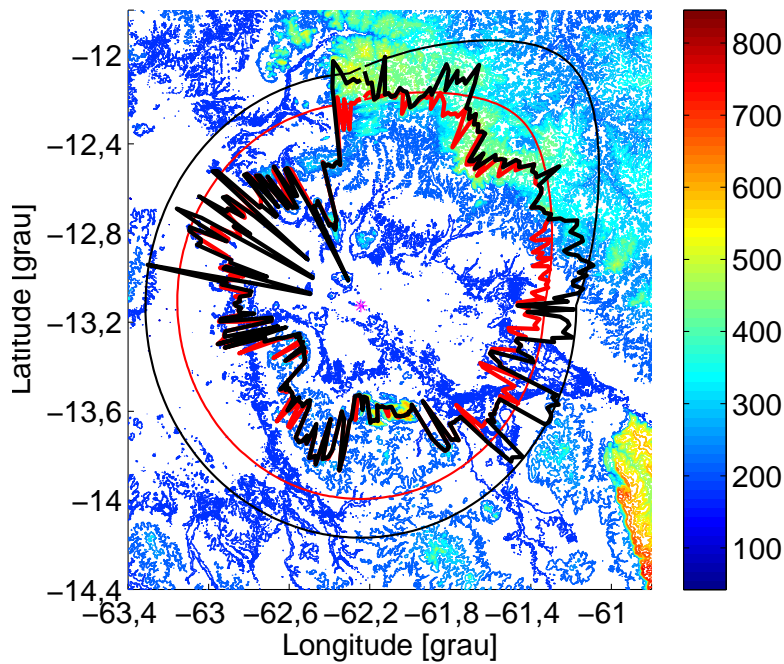


Figura 3.23: Área de coordenação de um receptor FS localizado em $(62,2444^{\circ}\text{W}, 13,1267^{\circ}\text{S})$ sob a influência de um único satélite da constelação MEO, onde a cor preta representa a área correspondente ao critério $p_1 = 0,0001$ e a cor vermelha ao critério $p_2 = 0,2$.

com um satélite parado e a distância de coordenação devido à constelação MEO possuem o mesmo valor. Isto ocorre devido ao relevo presente no entorno do receptor FS considerado nos cálculos para obtenção das distâncias, o qual possibilita que ambas distâncias de coordenação aproximem-se do receptor FS.

Na situação onde o receptor FS vê a antena da estação terrena de frente, observa-se que este efeito de maior ganho na direção do receptor FS resultou em uma maior distância de coordenação (na maioria dos azimutes) para o caso da comunicação com o satélite parado do que para o caso da comunicação com a constelação MEO. Note que nas proximidades da distância de coordenação desta situação, o relevo apresenta, em alguns pontos, alturas significativas em relação ao receptor FS, o que propiciou em alguns azimutes que a distância de coordenação sejam iguais para os dois casos de comunicação.

Por fim, observado o comportamento da interferência produzida pela comunicação de uma estação terrena com um satélite de uma constelação MEO em um receptor FS e o efeito do relevo no resultado final da área de coordenação, procedeu-se a determinação de uma região de coordenação na fronteira entre o Brasil e a Bolívia. Novamente, considerou-se que a Bolívia possui estações FS e o Brasil estações HDFSS compartilhando a mesma faixa de frequências.

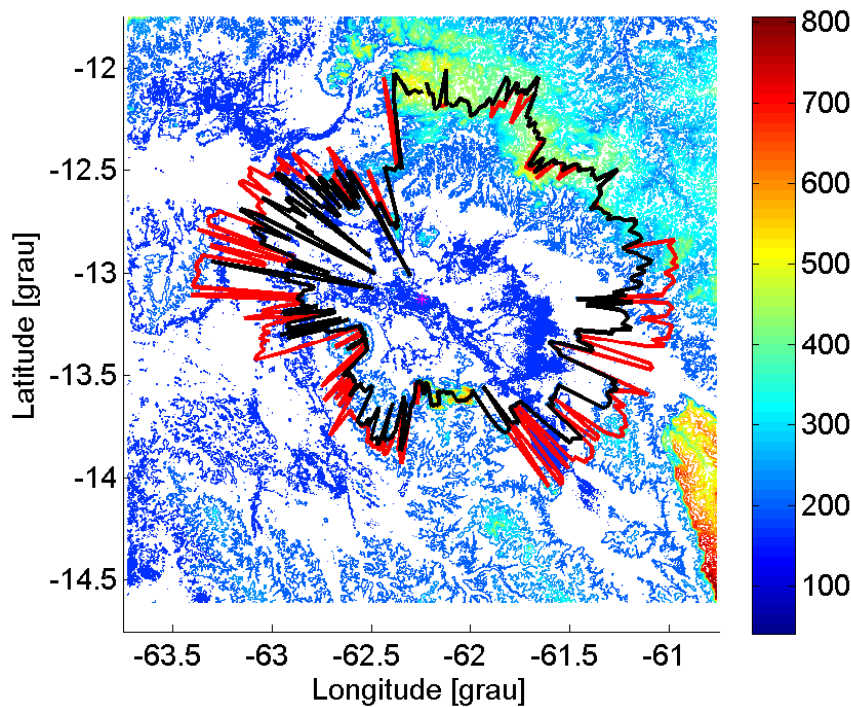


Figura 3.24: Comparação entre áreas de coordenação correspondentes ao critério $p_1 = 0,0001$ obtidas sob a influência da comunicação com a constelação MEO (representada pela cor vermelha) e com um satélite parado (representada pela cor preta), considerando o relevo no entorno do receptor FS.

Como anteriormente, para a determinação desta região de coordenação, considerou-se um conjunto de receptores FS com distribuição geográfica uniforme ao longo da fronteira entre os dois países. Foram considerados 28 receptores FS ao longo da fronteira entre o Brasil e a Bolívia, distantes 10 km um do outro. O resultado desta região é apresentado na Figura 3.25.

A área de coordenação no entorno de cada receptor FS foi determinada com base na menor distância de coordenação que satisfaz aos dois critérios de proteção utilizados. Observe que a sobreposição destas áreas de coordenação forma uma borda de coordenação na fronteira entre os países. Fora da região de coordenação, estações terrenas operando num sistema HDFSS no Brasil podem ser implantadas sem a necessidade de coordenação com o Serviço Fixo Terrestre do país vizinho (Bolívia).

Na Figura 3.26 são apresentadas as três bordas da região de coordenação obtidas para os cenários LEO-1, LEO-2 e MEO. Observa-se na figura que devido às diferentes características das constelações e dos diferentes parâmetros utilizados para a estação terrena em cada constelação, as bordas possuem forma e distâncias à fronteira diferentes. Note ainda que, como esperado, as bordas correspondentes às constelações com maior densidade de potência de

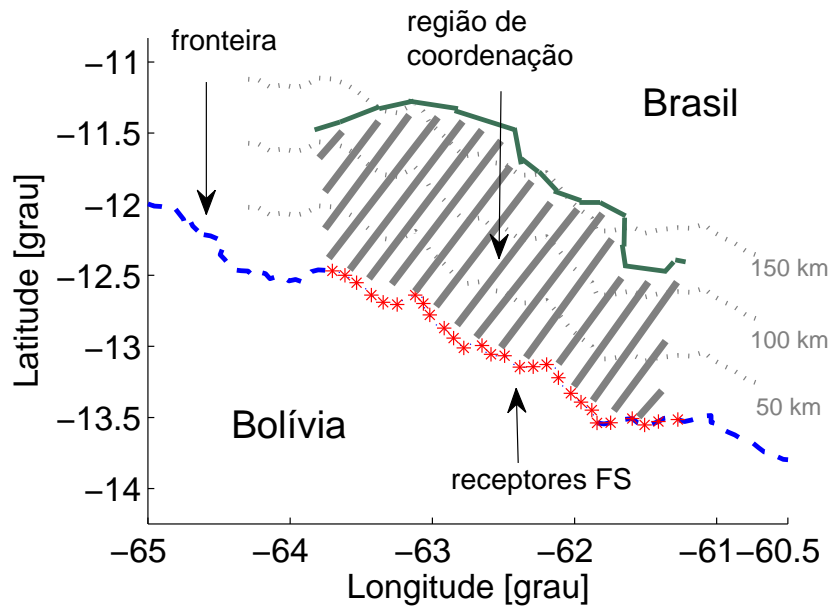


Figura 3.25: Região de coordenação, baseada na constelação MEO, na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.

transmissão da estação terrena, possuem maior distância em relação à fronteira, sendo estas, em ordem crescente, as constelações LEO-1, LEO-2 e MEO.

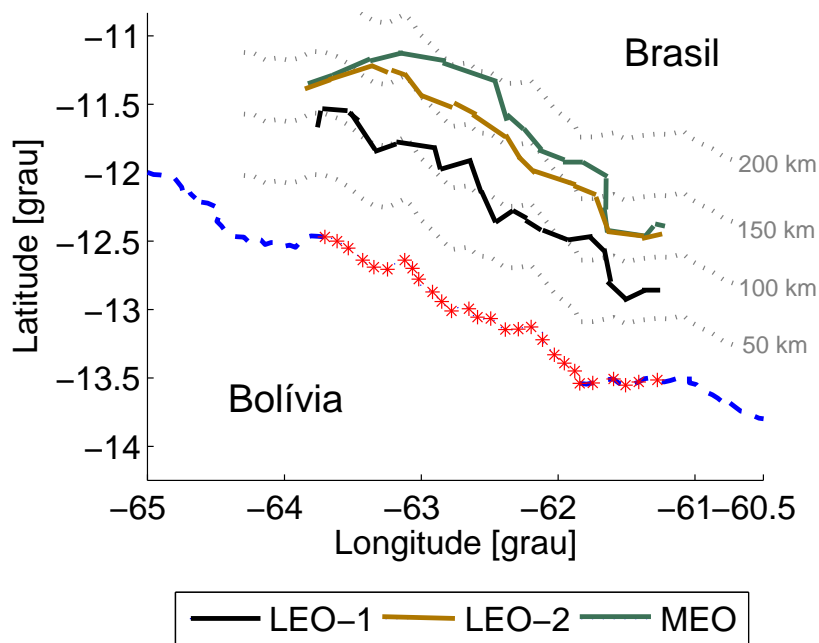


Figura 3.26: Regiões de coordenação na fronteira entre o Brasil e a Bolívia.

4

Conclusão

Este trabalho considerou o estudo da implantação ubíqua de terminais HDFSS, avaliando a interferência produzida por tais terminais em sistemas do Serviço Fixo Terrestre que compartilhem a mesma faixa de frequências em caráter primário. Esta avaliação tem sido objeto de estudos do Grupo 4 do Setor de Radiocomunicações da UIT e tem motivado a realização de análises envolvendo sistemas HDFSS.

Neste intuito, este trabalho considerou o problema da determinação de uma região de coordenação na fronteira entre países, um deles utilizando a faixa de frequências exclusivamente para o serviço FS e outro utilizando a mesma faixa para o serviço HDFSS. Com este objetivo, foi proposta uma metodologia para determinação de uma região de coordenação ao longo da fronteira entre dois países, fora da qual estações terrenas transmissoras ubiquamente distribuídas podem operar sem a necessidade de coordenação com os receptores FS que operam no país vizinho. A coordenação seria apenas necessária para estações terrenas localizadas dentro da região de coordenação.

A metodologia apresentada foi fundamentada na utilização de uma função distribuição de probabilidade da interferência produzida por um sistema interferente (neste trabalho, estações terrenas) em um sistema vítima (receptor FS). Esta metodologia considerou ainda critérios de interferência usualmente utilizados para proteção do Serviço Fixo Terrestre e a caracterização estatística dos parâmetros relacionados ao movimento orbital da constelação de satélites não-geoestacionários considerada no HDFSS.

No que concerne a caracterização estatística do movimento orbital das constelações, foi utilizado o método da simulação do movimento orbital, o qual, para os níveis de interferência necessários para o trabalho, este método, de aplicação menos complexa, mostrou-se eficaz. Para o critério de interferência, foi considerado um critério análogo ao da Recomendação ITU-R F.1495, o qual impõe restrições do comportamento estatístico da razão interferência-ruído (I/N) na entrada do receptor FS. Foram utilizados dois critérios de proteção, um de baixa probabilidade (ou, como citado na recomendação, de curto prazo), correspondente à $p_1 = 0,0001$, e outro de alta probabilidade (ou, como citado

na recomendação, de longo prazo), correspondente à $p_2 = 0,2$. Com efeito, pôde-se observar a influência direta do critério de proteção na determinação de uma área de coordenação.

Cabe ressaltar que a implementação da metodologia apresentada neste trabalho diferiu substancialmente do procedimento apresentado no Apêndice 7 do RR. Neste trabalho, visou-se a determinação da área de coordenação ao redor do sistema FS (sistema vítima), ao invés da estação terrena, como realizado no Apêndice 7. Esta mudança permitiu considerar posições fixas para as estações FS e a utilização da premissa de que as estações terrenas FSS podem estar em qualquer lugar, conforme característica dos sistemas HDFSS.

Outrossim, o modelo matemático apresentado no Capítulo 2 para determinação da distância de coordenação foi definido com base nos níveis de interferência admissíveis na entrada do receptor do sistema vítima. Dessa forma, as características e premissas utilizadas nas configurações dos sistemas vítima e interferente tornaram-se mais claras e objetivas, facilitando a execução da metodologia.

A metodologia proposta foi aplicada a três cenários diferentes envolvendo receptores do FS e estações terrenas do HDFSS que utilizam satélites em órbitas não geoestacionárias. Esses cenários consideraram duas constelações de satélites LEO (Cenário 1 e Cenário 2), uma delas com órbitas polares, e uma constelação de satélites MEO (Cenário 3). Os resultados obtidos para os 3 cenários, apresentados no Capítulo 3, permitem avaliar que, em geral,

- os critérios de proteção associados a menores probabilidades (critérios de curto prazo) apresentam maior área de coordenação;
- o relevo no entorno do receptor FS desempenha um papel fundamental na determinação das distâncias de coordenação;
- pontos altos de relevo tendem a constituir barreiras naturais para a distância de coordenação;
- as características do movimento orbital da constelação de satélites considerada influenciam diretamente o resultado final obtido.

Adicionalmente, em cada cenário analisado, foi avaliado o efeito do movimento da constelação de satélites na área de coordenação. Para tal, foi considerada a situação hipotética (e irreal) onde um satélite da constelação estaria parado. A área de coordenação obtida para esta situação hipotética de satélite parado foi comparada à área de coordenação correspondente à constelação em movimento. Verificou-se que, conforme esperado, o satélite parado implica um alongamento da área de coordenação na direção de azimuth

oposta à posição do satélite, enquanto que nas demais direções, ocorre uma retração da área de coordenação.

Finalmente, a metodologia proposta foi utilizada na determinação de uma região de coordenação ao longo da fronteira entre o Brasil e a Bolívia. Considerou-se sistemas FS (sistema vítima) na Bolívia e sistemas HDFSS no Brasil.

As regiões de coordenação obtidas para os 3 cenários avaliados indicaram que, conforme esperado, sistemas HDFSS que utilizam estações terrenas com uma maior densidade de potência de transmissão (como, por exemplo, o sistema MEO considerado) implicam em uma maior região de coordenação ao longo da fronteira entre os países. Conclusões específicas envolvendo os cenários analisados foram apresentadas ao longo do Capítulo 3.

Referências Bibliográficas

- [1] *Possible methodology for frequency sharing between ubiquitously deployed earth station of the fixed-satellite service and stations of the terrestrial services in adjacent areas*, Anexo 4, Documento 4A/343, Grupo de Trabalho 4A da União Internacional de Telecomunicações, Genebra, Outubro de 2013.
- [2] *Possible methodology for frequency sharing between ubiquitously deployed earth station of the fixed-satellite service and stations of the terrestrial services in adjacent areas for sharing situations described in Appendix 7 of the Radio Regulations*, Anexo 5, Documento 4A/468, Grupo de Trabalho 4A da União Internacional de Telecomunicações, Genebra, Fevereiro de 2014.
- [3] *Regulamento de Radiocomunicações*, União Internacional de Telecomunicações, 2012.
- [4] *Interference criteria to protect the fixed service from time varying aggregate interference from other services sharing the 17.7-19.3 GHz band on a co-primary basis*, Recommendation ITU-R F.1495, Genebra, 1996.
- [5] J.M. Fortes and R. Sampaio Neto, 'An analytical method for assessing interference in an environment involving NGSO satellite networks', *Proc. 1998 IEEE/SBT Int. Telecommunications Symp. (ITS'98)*, São Paulo, Brazil, August 1998.
- [6] ALBUQUERQUE, J. P. A.; FORTES, J. M.; FINAMORE, W. A. *Probabilidades, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos*; Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- [7] *Mathematical model of average and related radiations patterns for line-of-sight point-to-point radio-relay system antennas for use in certain coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz*, Recommendation ITU-R F.1245-1, Genebra, 2000.

- [8] *Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 31 GHz*, Recommendation ITU-R S.465-6, Geneva, 2000.

A

Procedimento para determinar o valor L_p da perda de propagação que não é excedido durante $P\%$ do tempo

O modelo matemático utilizado neste trabalho foi baseado no Anexo 1 do Apêndice 7 do Regulamento de Radiocomunicações da UIT [3]. Este apêndice descreve métodos para a determinação da área de coordenação em torno de uma estação terrena que opere na faixa de frequências entre 100 MHz e 105 GHz. Cabe ressaltar que a área de coordenação não é uma área de exclusão dentro da qual estações terrenas ou receptores FS compartilhando a mesma faixa de frequência estão proibidos de operar, mas sim uma área onde estudos mais detalhados sobre potência interferente precisam ser analisados.

O Apêndice 7 aborda a perda de propagação em duas metodologias considerando diferentes fenômenos de propagação, classificados como modo de propagação (1) e modo de propagação (2). O modelo do modo de propagação (1) diz respeito à perda de propagação em céu claro, considerando a atenuação devido à espalhamento troposférico, dutos, reflexão e refração nas camadas atmosféricas, absorção gasosa e perdas devido ao ambiente em torno da estação terrena. O modelo do modo de propagação (2), o qual não foi considerado neste trabalho, diz respeito à perda de propagação avaliando-se o espalhamento por hidrometeoros. Note que estes dois modelos são complementares, o que não torna sua avaliação conjunta estritamente necessária.

Adicionalmente, o Apêndice 7 descreve cenários com respeito às diferentes configurações entre estações interferentes e estações interferidas e o tipo de serviço utilizado. Estes cenários contêm informações adicionais a serem utilizadas nas variáveis dos modos de propagação (1) e (2). Neste trabalho foram utilizados o modo de propagação (1) e os cenários de uma estação terrena operando com satélites geoestacionários e satélites não-geoestacionários.

Isto posto, o objetivo do Apêndice 7 é apresentar de forma resumida a metodologia para a predição da perda de propagação em céu claro. A Figura A.1 descreve num diagrama em blocos as etapas dos cálculos aplicados para obtenção do valor da perda de propagação L_p .

Nos tópicos a seguir serão descritas as principais características das etapas dos cálculos desenvolvidos.

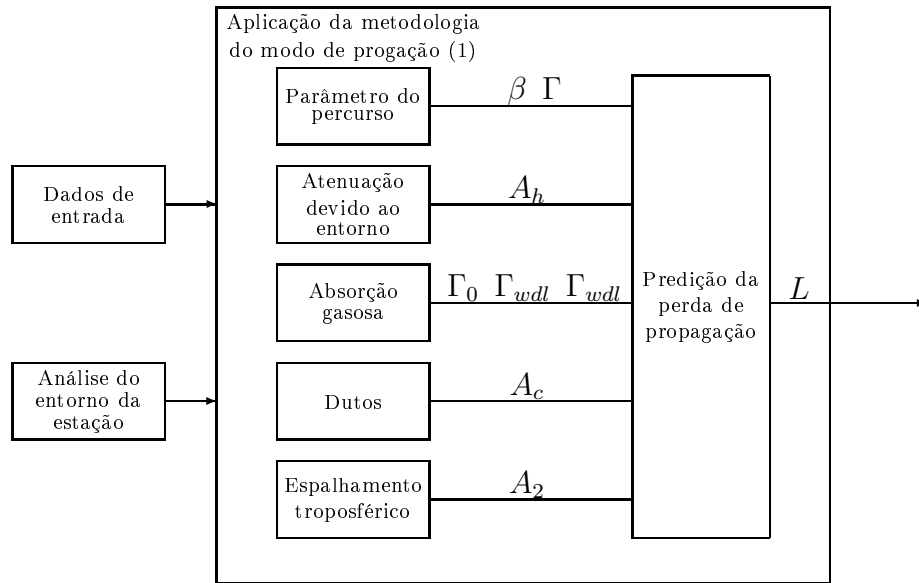


Figura A.1: Diagrama em blocos das etapas dos cálculos aplicados.

A.1

Dados de entrada

Os parâmetros básicos necessários para a aplicação do modo de propagação (1) são:

- f : frequência de operação [GHz]
- P : porcentagem de tempo para a qual o valor L_p da perda de propagação não é excedido [%]
- P_t : densidade de potência do sinal transmitido pela estação terrena [dB[W/MHz]]
- G_t : ganho da antena transmissora da estação terrena na direção do receptor FS [dBi]
- G_r : ganho da antena receptora do FS [dBi]
- P_r : densidade de potência admissível nos terminais da antena receptora do FS [dB[W/MHz]]
- d : distância a qual se deseja calcular a perda [km]
- ϕ_t : latitude da localização da estação terrena [graus]
- ψ_t : longitude da localização da estação terrena [graus].

A.2

Análise do ambiente em torno da estação terrena

Os parâmetros básicos necessários para a aplicação do modo de propagação (1) considerando as características do perfil no entorno da estação terrena são:

- h : altura do perfil no entorno da estação terrena [m]
- d : distância do ponto de altura h à estação terrena [m]
- ϵ_h : ângulo de elevação do horizonte, medido a partir das informações do ambiente em torno da estação terrena [grau].

Estes parâmetros são utilizados para o cálculo das perdas devido ao ambiente no entorno da estação terrena. Este tipo de perda é apropriada quando a estação terrena está localizada nas proximidades de ambientes saturados (edificações e florestas), que é o caso do estudo deste trabalho. Para obtenção da altura do perfil foi utilizada a base de dados disponível no site http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1. Esta base foi desenvolvida pela agência espacial americana (NASA) por meio do programa Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Neste programa a topografia da superfície terrestre foi medida e disponibilizada gratuitamente para consulta.

Cobrindo o globo terrestre de 60° N a 56° S, a base é disponibilizada em matrizes quadradas, onde cada arquivo corresponde a uma unidade geográfica de tamanho equivalente a 1° x 1°, contendo os valores de elevação em metros. Os arquivos são disponibilizados em dois tipos de resolução, um contendo dados em intervalos de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros) e outro em intervalos de 3 arco-segundos (aproximadamente 90 metros). Contudo, apenas para os territórios dos EUA foram disponibilizados dados em maior resolução. Dessa forma, neste trabalho foram utilizados os arquivos com resolução de 90 metros.

A partir dos dados de elevação obtidos no SRTM, foi calculada, dada uma direção de azimuth, a coordenada geográfica do ponto de elevação mais relevante a ser utilizada como distância de horizonte. A partir desta coordenada, mediu-se a distância à estação terrena, possibilitando, dessa forma, o cálculo do parâmetro ϵ_h , necessário para a aplicação da metodologia, conforme ilustrado na Figura A.2.

Para o cálculo da distância entre coordenadas geográficas, foi utilizado o método do arco convexo ao invés da distância euclidiana. Esta abordagem foi utilizada com a finalidade de obter-se um cálculo mais preciso da distância entre duas coordenadas, visto que à medida em que a distância aumenta,

a curvatura da Terra aumenta o erro no cálculo da distância por meio da distância euclidiana. Este método, por meio de uma coordenada inicial e uma coordenada final fornecidas, calcula as coordenadas dos pontos intermediários, como ilustrado na Figura A.2.

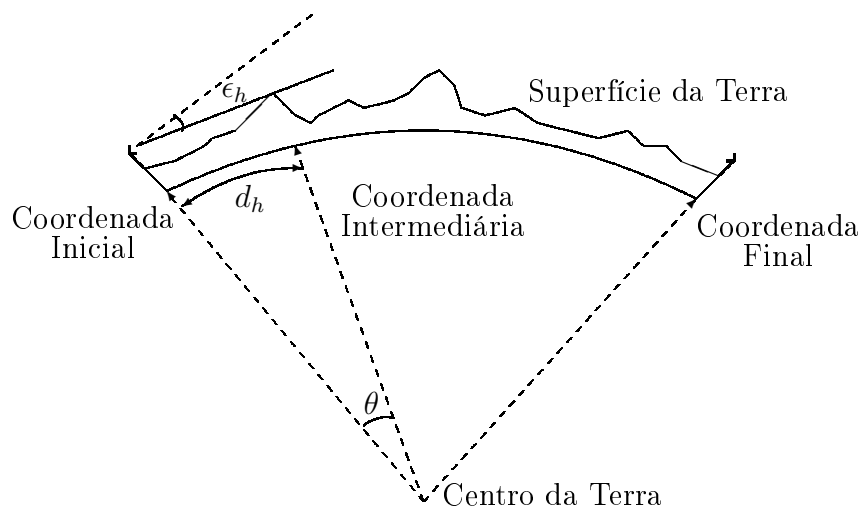


Figura A.2: Ilustração do cálculo do ângulo de elevação do horizonte e do método do arco convexo.

Note que possuindo a coordenada de um ponto intermediário, a distância deste ponto à estação terrena é obtida por meio do cálculo do comprimento de arco formado pela estação terrena e o ponto em questão.

A.3

Atenuação devido ao entorno da estação terrena

Esta atenuação é calculada considerando-se os parâmetros de distância ao horizonte d_h e o ângulo de elevação do horizonte ϵ_h , para cada azimuth, como ilustrado na Figura A.2. Estes parâmetros são calculados utilizando-se a base de dados de elevação do SRTM, onde, para cada azimuth, é verificado qual é o ponto de elevação mais relevante para a estação terrena, ou seja, qual ponto de elevação origina a maior inclinação com o ponto onde está localizada a estação terrena.

A atenuação total devido ao entorno da estação terrena é expressa por meio do parâmetro A_h , em dB. O valor da atenuação é limitado no intervalo $-10 \leq A_h \leq (30 + \epsilon_h)$, pois valores fora deste intervalo não são atingidos na prática.

Os parâmetros necessários para o cálculo desta atenuação são:

- d_h : distância da estação terrena ao ponto de altura h mais relevante [m]

- ϵ_h : ângulo de elevação do horizonte, medido segundo a estação terrena [grau]
- f : frequência de operação [GHz].

A.4

Absorção gasosa

A atenuação total devido à absorção gasosa é composta de três principais contribuições, o γ_o , que corresponde à atenuação devido ao ar seco, o γ_{wdl} , que corresponde à atenuação devido ao vapor de água de densidade $7,5 \text{ g/m}^3$ para percursos sobre as zonas A1 e A2, e o γ_{wds} , que corresponde à atenuação devido ao vapor de água de densidade $10,0 \text{ g/m}^3$ para percursos sobre as zonas B e C. Contudo, como as estações estudadas neste trabalho estão localizadas sobre a zona A2, o γ_{wds} não será considerado nos cálculos.

Os parâmetros necessários para o cálculo da atenuação devido à absorção gasosa são:

- f : frequência de operação [GHz]
- ρ : densidade do vapor de água [g/m^3].

A.5

Dutos

Este fenômeno reduz a atenuação devido ao acoplamento direto por dutos em percursos sobre o mar. Todavia, o modelo proposto no regulamento considera um fator mínimo para os casos em que o percurso não ocorra sobre o mar. O parâmetro utilizado neste cálculo é:

- d_c : distância da estação terrena à costa na direção em questão [km].

A.6

Espalhamento troposférico

A perda devido ao espalhamento troposférico é expressa na variável A_2 . No cálculo desta atenuação são utilizados os seguintes parâmetros:

- f : frequência de operação [GHz]
- ϵ_h : ângulo de elevação do horizonte, medido segundo a estação terrena [grau]
- N_0 : refratividade ao nível do mar.

- P : porcentagem de tempo para a qual o valor de L_p da perda de propagação não é excedido [%]

A equação para o cálculo do parâmetro N_0 é fornecida no §4.1 do Apêndice 7.

A.7

Parâmetros do percurso

Adicionalmente aos fenômenos citados acima, são levados em consideração no cálculo da predição da perda de propagação fatores dependentes do percurso. Estes fatores são a incidência de dutos no percurso, parâmetro β , e a dependência do tempo no percurso, parâmetro Γ_1 .

Para o cálculo desses parâmetros, são utilizados:

- d_{lm} : maior distância contínua sobre terra percorrida na zona A2, ao longo da direção em questão [km]
- d_{tm} : maior distância contínua (i.e. terra + costa), zona A1 + zona A2, ao longo da direção em questão [km]
- ζ : latitude da localização da estação terrena [grau]
- d_i : distância utilizada na i -ésima iteração para o cálculo de L_p [km].

A.8

Predição da perda de propagação

Finalmente, após estabelecido o algoritmo considerando todos os fenômenos descritos, o valor da perda de propagação predita pelo modelo é obtido por iteração da distância à estação terrena. Para cada iteração, aumenta-se a distância à estação terrena até que o valor da perda seja maior ou igual à perda mínima estabelecida para a porcentagem de tempo em questão, como ilustrado na Figura A.3.

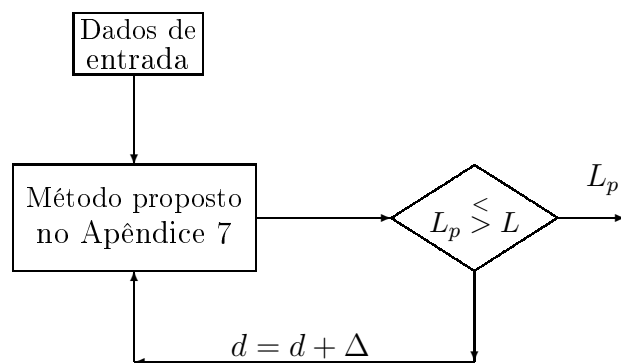


Figura A.3: Iteração realizada no algoritmo para calcular o valor L_p .

Note que os cálculos abordados são realizados considerando-se um azimute particular e uma dada porcentagem de tempo P . Para obtenção das curvas de distribuição de probabilidade da perda de propagação é necessário calcular o algoritmo para todo intervalo de probabilidade o qual se deseja observar, limitado entre 0,001 % e 50 % para a frequência de operação utilizada neste trabalho. Dessa forma, para cada azimute, obtém-se uma curva de distribuição de probabilidade que é função da distância à estação terrena.