

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**COMUNICAÇÕES IMT-2020:
INTERFERÊNCIA E COMPARTILHAMENTO
DE FREQUÊNCIA EM ONDAS MILIMÉTRICAS**

Calil Bento Queiroz

Brasília, maio de 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

COMUNICAÇÕES IMT-2020: INTERFERÊNCIA E
COMPARTILHAMENTO DE FREQUÊNCIA EM ONDAS
MILIMÉTRICAS

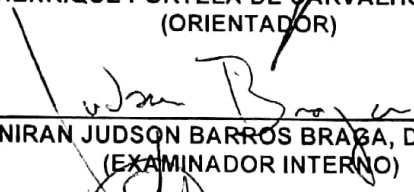
CALIL BENTO QUEIROZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



ADONIRAN JUDSON BARROS BRAGA, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



VICENTE ANGELO DE SOUSA JUNIOR, Dr., UFRN
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 27 de maio de 2019.

Dedicatória

Aos meus pais, por incentivarem a minha curiosidade.

Calil Bento Queiroz

RESUMO

Projeções estimam que, globalmente, o tráfego mensal de dados móveis pode chegar a 57 exabytes em 2020, com perspectivas de crescimento exponencial nos anos subsequentes. Mais do que isso, a quantidade e densidade de usuários em redes de telefonia móvel também deve aumentar significativamente, uma vez que *smartphones* e dispositivos sem fio estão ficando cada vez mais difundidos. Como sistemas de telefonia de quarta geração não estão preparados para atender a essa demanda, a União Internacional de Telecomunicações (UIT) definiu o IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications 2020*, telecomunicações móveis internacionais 2020) como o conjunto de tecnologias de quinta geração para redes de comunicação móvel em uso a partir de 2020.

O IMT-2020 deve operar também em faixas de frequências altas, acima de 20 GHz, conhecidas como faixas de ondas milimétricas. Das faixas em estudo para serem identificadas para o IMT-2020, as bandas de 27-27,5 GHz e 37-42,5 GHz são alocadas ao serviço de satélite fixo, por exemplo, e a faixa de 42,5-43,5 GHz é identificada para o serviço de radioastronomia. Qualquer alocação dessas bandas para o IMT-2020 deve acontecer mediante a realização de estudos de compartilhamento que mostrem que ele não causará interferência danosa aos sistemas existentes.

Esses estudos são ainda mais relevantes se considerarmos que no ano de 2019 será realizada a *World Radiocommunication Conference* (WRC, Conferência Mundial de Rádiocomunicação). Nela, a UIT realizará debates e discussões com o objetivo de rever e revisar as Regulamentações de Rádio para os próximos anos. Com isso, a agenda do evento já inclui debates referentes à alocação de frequência para o IMT-2020 baseada em estudos de convivência submetidos por estados membros e convidados. Para contribuir ativamente com esses estudos, a Agência Nacional de Telecomunicações vem desenvolvendo, junto com parceiros da academia e da indústria, o simulador SHARC, projetado para executar simulações de compartilhamento e convivência.

Uma das tecnologias que pode integrar o IMT-2020 é o *full duplex*, por meio do qual estações transmitem e recebem informação ao mesmo tempo na mesma frequência. Essa tecnologia foi considerada inviável por muito tempo, devido à autointerferência que a transmissão de uma estação operando em *full duplex* causa ao sinal que ela recebe. Recentes avanços na eletrônica, no entanto, têm proporcionado técnicas de cancelamento dessa autointerferência em níveis que permitem a implementação de um nó *full duplex* operacional. Outro desafio introduzido pelo *full duplex* é a maior interferência sistêmica que ele introduz, tanto dentro da rede celular quanto a sistemas operando na mesma faixa de frequência. Como é provável que o IMT-2020 compartilhe espectro com outros serviços, essa interferência extra introduzida pelo *full duplex* pode lhes ser danosa.

Esse trabalho apresenta estudos de compartilhamento de frequência do IMT-2020 com os serviços citados acima. É utilizada a ferramenta FD-SHARC, uma variação do simulador SHARC para avaliação de tecnologias *full duplex*. Inicialmente, a metodologia de simulação é descrita, seguida por uma avaliação da viabilidade do *full duplex*, de forma a se levantar os cenários mais prováveis de implementação dessa tecnologia. Em seguida, os estudos de convivência são apresentados e os níveis de interferência estimados em simulação são avaliados perante os critérios de proteção dos

sistemas interferidos.

Conclui-se que o IMT-2020 pode compartilhar as faixas de frequência supracitadas, desde que algumas restrições sejam impostas. Distâncias de separação entre as redes IMT e as estações terrestres do serviço de satélite fixo e as estações de radioastronomia devem ser empregadas. Mais do que isso, quando operando em ambientes *indoor*, o IMT-2020 pode utilizar as mesmas faixas de frequência que o terminal de usuário do serviço de satélite fixo, desde que alguma medidas de coordenação simples sejam empregadas. Por fim, a estação espacial do serviço de satélite fixo estará protegida de interferência em todos os casos simulados.

Vários dos resultados apresentados aqui foram submetidos à UIT, e fazem parte dos textos preparatórios para a WRC. Junto com centenas de outros estudos, eles serão utilizados como base para se criar regulamentações de validade global, e ajudarão agências regulatórias do mundo todo a tomar decisões técnicas específicas para a realidade de cada país. Além disso, no conhecimento do autor, estudos de convivência do IMT-2020 operando em *full duplex* com outros sistemas não estão presentes na literatura. Nesse sentido, este trabalho apresenta contribuições pioneiras que aprofundam a discussão sobre a viabilidade dessa tecnologia.

ABSTRACT

Projections estimate that global mobile data traffic may reach 57 exabytes by 2020, followed by an exponential growth in subsequent years. More than that, the number and density of mobile network users may also increase significantly, once smartphones and wireless devices are becoming more and more popular. Since fourth generation mobile communications systems are not equipped to deal with this demand, the International Telecommunications Union has standardized IMT-2020 (International Mobile Telecommunications 2020) as the set of fifth generation technologies for mobile communications networks beyond 2020.

IMT-2020 will also operate in frequency bands beyond 20 GHz, known as millimeter-wave bands. From the bands being studied as possible allocations for IMT-2020, the 27-27.5 GHz and the 37-42.5 GHz bands are identified to the fixed-satellite service, for example, and the 42.5-43.5 GHz band is identified to the radio-astronomy service. Any identification of these bands for IMT-2020 needs to take place upon the realization of frequency sharing studies that show that the new service will not cause harmful interference to existing services.

Such studies are even more relevant in 2019, when the World Radio Conference will happen. In it, the International Telecommunications Union will host debates and discussions with the goal of revising and reviewing the radio regulations for the incoming years. Because of that, the event's agenda already includes debates around the frequency allocations for IMT-2020, based on sharing studies submitted by member states and guests. In order to contribute actively with the studies, the Brazilian National Telecommunications Agency has been developing, together with partners

from academia and industry, the SHARC simulator, for sharing and compatibility analysis.

One of the technologies that might be a part of IMT-2020 is Full Duplex, by which stations can transmit and receive data at the same time in the same frequency band. This technology was considered infeasible for a long time, due to the self-interference that the *full duplex* station's transmission causes to the signal it receives. Recent advances in electronics, however, have made available self-interference cancellation techniques that allow the implementation of an operational *full duplex* node. Another challenge introduced by *full duplex* is the higher systemic interference it introduces, either to the cellular network or to systems operating on its frequency band. Since it is probable that IMT-2020 will share spectrum with other services, this extra interference introduced by *full duplex* might be harmful to other systems.

Thus, this work presents frequency sharing studies between IMT-2020 and the systems cited above. These studies were performed with the FD-SHARC simulation tool, a fork of the SHARC simulator for analysis of *full duplex* technologies. The simulation methodology is described, followed by a feasibility analysis of *full duplex* technologies, so to define the scenarios in which this technology is more probable to be implemented. After that, sharing studies are presented and the interference levels estimated in the simulations are evaluated against the protection criteria of the interfered-with systems.

The study concludes that IMT-2020 can indeed share the frequency bands mentioned, as long as some restrictions are imposed. Separation distances between the IMT networks and the earth stations of the fixed-satellite service and radio-astronomy stations must be established. Besides, when operating indoors, IMT-2020 can use the same frequency as the fixed-satellite service user terminal, as long as some simple coordination measures are employed. Finally, the space station of the fixed-satellite system is protected from interference in all the simulated cases.

Many of the results presented here were submitted to the International Telecommunications Union and are part of the preparatory texts for the World Radio Conference. Together with hundreds of other studies, they will be used as basis for the creation of regulations of worldwide scope and will help regulatory agencies around the world take technical and country-specific decisions. Furthermore, in the best knowledge of the author, sharing studies between IMT-2020 operating in *full duplex* and other systems are not present in the literature. In that sense, this work presents novel contributions that deepen the discussion about the feasibility of this technology.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.1.1	COMUNICAÇÕES IMT-2020	2
1.1.2	REGULAMENTAÇÃO DE ESPECTRO PARA O IMT-2020	3
1.1.3	O SIMULADOR SHARC	4
1.1.4	COMUNICAÇÕES <i>full duplex</i>	5
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	6
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	6
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	INTRODUÇÃO	8
2.2	COMUNICAÇÕES IMT-2020	8
2.2.1	ONDAS MILIMÉTRICAS	9
2.2.2	FORMAS DE ONDA	10
2.2.3	MIMO E CONFORMAÇÃO DE FEIXE	11
2.2.4	COMUNICAÇÕES <i>Full-Duplex</i>	12
2.2.5	CONVIVÊNCIA COM OUTROS SISTEMAS	18
2.3	O SERVIÇO DE SATÉLITE FIXO	18
2.3.1	COMPARTILHAMENTO E CONVIVÊNCIA COM O IMT-2020	19
2.4	A RADIOASTRONOMIA	19
2.4.1	COMPARTILHAMENTO E CONVIVÊNCIA COM O IMT-2020	20
3	METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	21
3.1	INTRODUÇÃO	21
3.2	O SIMULADOR	21
3.2.1	FLUXO DE SIMULAÇÃO	21
3.2.2	CARGA NA REDE	24
3.3	MODELAGEM DO SERVIÇO DE SATÉLITE FIXO	32
3.3.1	ESTAÇÃO ESPACIAL	33
3.3.2	ESTAÇÃO TERRESTRE <i>gateway</i>	37
3.3.3	TERMINAL DE USUÁRIO	38
3.4	A RADIOASTRONOMIA	41

3.4.1	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO E MODELO DE PROPAGAÇÃO	41
3.4.2	INDICADORES DE DESEMPENHO.....	42
3.5	CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO	42
4	RESULTADOS E ANÁLISE DO <i>full duplex</i>	44
4.1	INTRODUÇÃO	44
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE TOPOLOGIAS	44
4.3	CANCELAMENTO DE AUTOINTERFERÊNCIA	48
4.4	DESEQUILÍBRIO DE CARGA	50
4.5	CASO DE ALTA INTERFERÊNCIA	52
5	ESTUDOS DE CONVIVÊNCIA	55
5.1	INTRODUÇÃO	55
5.2	COMPARTILHAMENTO COM O SERVIÇO DE SATÉLITE FIXO	55
5.2.1	COMPARTILHAMENTO COM A ESTAÇÃO ESPACIAL	56
5.2.2	COMPARTILHAMENTO COM A ESTAÇÃO TERRESTRE.....	57
5.2.3	COMPARTILHAMENTO COM O TERMINAL DE USUÁRIO DO SERVIÇO DE SATÉ- LITE FIXO	60
5.3	COMPARTILHAMENTO COM A RADIOASTRONOMIA	61
6	CONCLUSÕES	63
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	63
6.2	INFERÊNCIAS DOS RESULTADOS.....	64
6.3	AVALIAÇÃO PERANTE OS OBJETIVOS.....	65
6.4	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	66
6.5	TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
	ANEXOS.....	76
I	COTRIBUIÇÕES DO AUTOR PARA O SIMULADOR SHARC.....	77
II	<i>Wrap Around</i>	79
III	ÁREA DE COBERTURA DA ESTAÇÃO ESPACIAL.....	81
IV	NORMALIZAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO	84
V	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	85
V.1	PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DO CAPÍTULO 4.....	85
V.2	PARÂMETROS DAS SIMULAÇÕES DO CAPÍTULO 5.....	89

LISTA DE FIGURAS

2.1	Organização dos símbolos de um sistema a) de portadora única e b) OFDM.....	11
2.2	Sistemas a) de antena única e b) MIMO.	12
2.3	Tipos de enlace <i>full duplex</i>	13
2.4	Interferência sistêmica em <i>half duplex</i> e <i>full duplex</i>	15
3.1	Diagrama de blocos do simulador.....	22
3.2	Topologias geradas pelo simulador.	23
3.3	Quantidade de enlaces versus proporção de tempo em a) <i>half duplex</i> e b) <i>full duplex</i>	25
3.4	Sistema de coordenadas do painel de antenas.	26
3.5	Diagrama de radiação horizontal e vertical de um elemento de antena.	26
3.6	Diagramas de radiação horizontal e vertical para (a) $\varphi_{i,feixe} = 0^\circ$ e (b) $\varphi_{i,feixe} = 30^\circ$. 28	
3.7	Diagramas de radiação a) horizontal e b) vertical da antena setorizada.....	29
3.8	a) Perda de propagação e b) probabilidade de linha de visada dos modelos UMi <i>Street Canyon</i> e UMA.....	29
3.9	Perda de propagação entre a) estações base e b) terminais de usuário na topologia macrocelular.....	30
3.10	a)Perda de propagação e b) probabilidade de linha de visada em cenário <i>indoor</i>	31
3.11	Diagrama de radiação da estação espacial.....	33
3.12	Elevação (θ_E) e ângulo de abertura (θ_a) do satélite.	34
3.13	Relação entre elevação e área de cobertura.	35
3.14	Rede de simulação para estudos de convivência com estação espacial.....	36
3.15	Diagrama de radiação da estação terrestre.....	37
3.16	Posição da estação terrestre em relação à rede IMT.	38
3.17	Diagrama de radiação do terminal de usuário do serviço de satélite fixo.....	39
3.18	Propagação entre o IMT e o terminal de usuário do serviço de satélite fixo.....	40
3.19	a) Posições do terminal de usuário FSS no cenário <i>indoor</i> e b)perdas associadas.....	40
3.20	Zona de exclusão da radioastronomia.....	41
3.21	Máscara espectral do sistema IMT e banda do RAS.	42
4.1	Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada na direção de descida em di- versas topologias.	45
4.2	Ganho de vazão agregada média proporcionado pelo <i>full duplex</i> para a direção de descida.	46
4.3	Distribuição cumulativa da vazão de dados de subida agregada em diversas topologias. 47	

4.4	Ganho de vazão agregada média proporcionado pelo <i>full duplex</i> para a direção de subida.....	47
4.5	Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada nas direções de a)descida e b)subida para diversos valores de cancelamento de autointerferência.	49
4.6	Ganho de vazão agregada média versus cancelamento de autointerferência.	50
4.7	Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada nas direções de a)descida e b)subida para diversos valores de distribuição de carga.....	51
4.8	Distribuição cumulativa da vazão de dados dos enlaces de a)descida e b)subida para diversos valores de distribuição de carga.....	52
4.9	a)Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada e b) ganho de vazão agregada média proporcionado pelo <i>full duplex</i> para a direção de descida.	53
4.10	a)Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada e b) ganho de vazão média proporcionado pelo <i>full duplex</i> para a direção de subida.	54
5.1	Distribuição cumulativa da razão interferência-ruído da estação espacial.	56
5.2	Distribuição cumulativa das amostras de razão interferência-ruído obtidas por simulação.....	57
5.3	Distribuição cumulativa da razão interferência-ruído da estação terrestre para IMT com desequilíbrio de carga de a) 1:1 e b) 4:1	58
5.4	Ganho de vazão agregada do <i>full duplex</i> para os cenários de compartilhamento com estação terrestre.....	59
5.5	Distribuição cumulativa da razão interferência-ruído do terminal de usuário do serviço de satélite fixo para IMT nas topologias a) <i>hotspot</i> e b) <i>indoor</i>	60
5.6	Distribuição cumulativa da interferência na banda do serviço de radioastronomia para o IMT operando em a) <i>half duplex</i> e b) <i>full duplex</i>	62
II.1	Rede a) original e b) depois das repetições do algoritmo de <i>wrap around</i>	79
III.1	Geometria do contorno da área de cobertura do satélite.	81
III.2	Contorno da área de cobertura do satélite para diversas elevações.	82
IV.1	Ganho total integrado em função do apontamento dos feixes do painel de antenas 8x8 das estações base.	84

LISTA DE TABELAS

1.1	Requisitos de sistemas IMT-2020.	2
1.2	Sobreposição entre faixas alocadas ao FSS e RAS e faixas em estudo para o IMT-2020.	5
4.1	Razão sinal-ruído-interferência média de descida para os cenários simulados.	46
4.2	Razão sinal-ruído-interferência média de subida para os cenários simulados.	48
5.1	Parâmetros do pós-processamento para grandes áreas para a estação espacial.	57
5.2	Percentual de casos simulados com razão interferência-ruído acima do critério de proteção da estação terrestre.	59
5.3	Percentual de casos simulados com interferência acima do critério de proteção	61
V.1	Parâmetros da topologia macrocelular.	85
V.2	Parâmetros da topologia <i>hotspot</i>	86
V.3	Parâmetros da topologia <i>indoor</i>	88
V.4	Parâmetros do modelo ITU-R P.452 [1].....	89
V.5	Parâmetros de interface enlace-sistema.....	89
V.6	Parâmetros da topologia <i>hotspot</i> nas faixas 37-42,5 GHz e 42,5-43,5 GHz.....	90
V.7	Parâmetros da topologia <i>indoor</i> na faixa de 37-42,5 GHz.....	91
V.8	Parâmetros da estação espacial do serviço de satélite fixo em 27-27,5 GHz	92
V.9	Parâmetros da estação terrestre do serviço de satélite fixo em 37-42,5 GHz	93
V.10	Parâmetros do terminal de usuário do serviço de satélite fixo em 37-42,5 GHz	93
V.11	Parâmetros da estação de radioastronomia na faixa de 42,5-43,5 GHz	94

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

$A_{\Delta n}$	Área do n-ésimo triângulo
A_A	Diagrama de irradiação
$A_{A,i}$	Ganho do i-ésimo feixe
A_E	Ganho de um elemento de antena
$A_{E,H}$	Ganho horizontal de um elemento de antena
$A_{E,V}$	Ganho vertical de um elemento de antena
A_m	Relação frente-costa horizontal de um elemento de antena
A_s	Área de cobertura
B	Banda de transmissão
B_{IMT}	Banda total alocada ao IMT
B_{rb}	Banda por bloco de recurso
CL	Perda de acoplamento
$CL_{BS,k}$	Perda de acoplamento para k-ésima estação base
$CL_{UE,l}$	Perda de acoplamento para l-ésimo terminal de usuário
d_h	Espaçamento horizontal entre elementos de antena
D_s	Densidade de estações
d_v	Espaçamento vertical entre elementos de antena
F	Figura de ruído
G_A	Ganho normalizado
$G_{E,max}$	Ganho máximo de um elemento de antena
G_T	Ganho total integrado
G_{tx}	Ganho da antena de transmissão
G_{rx}	Ganho da antena de recepção
I	Potência da interferência
I_{aggr}	Interferência agregada
$I_{aggr,n}$	Interferência agregada da n-ésima iteração
INR_n	razão interferência-ruído na n-ésima iteração
k	Constante de Boltzman
L_{body}	Perdas por absorção do corpo humano
$L_{ohm,tx}$	Perdas ôhmicas no transmissor
$L_{ohm,rx}$	Perdas ôhmicas no receptor
L_{pol}	Perdas de polarização

L_s	Atenuação dos lóbulos laterais
N	Número de pontos de contorno
N_H	Número de colunas da matriz de antenas
N_V	Número de linhas da matriz de antenas
$N_{UE,cell}$	Número de terminais de usuário por célula
$N_{rb,BS}$	Número de blocos de recurso por estação base
$N_{rb,UE}$	Número de blocos de recurso por terminal de usuário
N_s	Número total de estações
N_{sim}	Número de estações simuladas
P_{0PUSCH}	Potência alvo por bloco de recurso
$P_{BS,k}$	Potência recebida da k-ésima estação base
P_{CMAX}	Potência máxima de transmissão do terminal
PL	Perda de propagação
P_N	Potência do ruído
$P_{N,es}$	Potência do ruído na estação terrestre
$P_{N,sat}$	Potência do ruído na estação satelital
P_{PUSCH}	Potência de transmissão do terminal
P_{rx}	Potência recebida
P_{tx}	Potência transmitida
$P_{UE,l}$	Potência recebida do l-ésimo terminal de usuário
R	Raio da terra
R_a	RAção entre a área de <i>hotspots</i> e a área do ambiente
R_a	RAção entre a área do ambiente e a área total
r_g	Proporção de banda de guarda
S	Fator de segmento
S_a	Centro da antena do satélite
$SINR_{MAX}$	Razão sinal-ruído-interferência máxima
$SINR_{MIN}$	Razão sinal-ruído-interferência mínima
S_S	Ponto subsatélite
SLA_v	Atenuação vertical dos lóbulos laterais
T	Temperatura de ruído
$v_{n,m}$	Elemento do vetor de superposição
$w_{i,n,m}$	Elemento do vetor de pesos para o i-ésimo feixe

Símbolos gregos

α	Fator de atenuação
α_r	Rotação em torno do eixo da antena
β	Fator de atenuação
β_B	Arco da superfície terrestre entre o centro da área de cobertura e o ponto subsatélite
β_n	Arco da superfície terrestre entre n-ésimo ponto e o ponto subsatélite
ϵ_1	Ângulo de abertura vertical
ϵ_2	Ângulo de abertura horizontal
ϵ_m	Largura angular do feixe na direção do n-ésimo ponto
ζ_n	Azimute do n-ésimo ponto
θ	Direção de elevação
θ_{3dB}	Ângulo de abertura vertical de 3 dB
θ_a	Ângulo de abertura
θ_B	Latitude do centro da área de cobertura
θ_e	Ângulo de elevação
$\theta_{i,feixe}$	Elevação de apontamento do i-ésimo feixe
θ_n	Longitude do n-ésimo ponto
λ	Comprimento de onda
σ_d	Fator de escala
σ	Desvio padrão
ϕ	Direção de azimute
ϕ_{3dB}	Ângulo de abertura horizontal de 3 dB
$\phi_{i,feixe}$	Azimute de apontamento do i-ésimo feixe
ϕ_n	Ângulo de rotação
ϕ_{SB}	Longitude relativa entre centro da área de cobertura e o ponto subsatélite
ϕ_{Sn}	Longitude relativa entre n-ésimo ponto e o ponto subsatélite

Notação matemática

\hat{ABC}	Ângulo entre os pontos A, B e C
$\arcsen(\cdot)$	Função arcosseno
$\arctan(\cdot)$	Função arcotangente
$\cos(\cdot)$	Função cosseno
$\cotan(\cdot)$	Função cotangente
$\exp(\cdot)$	Função exponencial
j	Unidade imaginária
$\log_{10}(\cdot)$	Função logaritmo na base 10
$\min(\cdot)$	Função mínimo
$S(\cdot)$	Equação de Shannon
$\sen(\cdot)$	Função seno

Siglas

1G	Primeira geração de comunicações móveis
2G	Segunda geração de comunicações móveis
3G	Terceira geração de comunicações móveis
4G	Quarta geração de comunicações móveis
5G	Quinta geração de comunicações móveis
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
UIT	União Internacional de Telecomunicações

Unidades

°	Grau
%	Porcento
dB	Decibel
dBi	Decibel relativo à antena isotrópica
dBm	Decibel miliwatt
dBW	Decibel watt
Gbps	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
hPa	Hectopascal
Hz	Hertz
J	Joule
K	Kelvin
kbps	Quilobits por segundo
kHz	Quilohertz
km	Quilômetro
km/h	Quilômetros por hora
Mbps	Megabits por segundo
MHz	Megahertz
m	Metro
ms	Milisegundo

Siglas e abreviações de línguas estrangeiras

3GPP	<i>3G Partnership Project</i>	Projeto de parceira de terceira geração
BS	<i>Base Station</i>	Estação base
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	Acesso múltiplo por divisão de códigos
CL	<i>Coupling Loss</i>	Perda de acoplamento
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>	Semicondutor de metal-óxido complementar
CPOFDM	<i>Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais com prefixo cíclico
CSMA	<i>Carrier Sensing Multiple Access</i>	Acesso múltiplo por sensoriamento de portadora
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>	Taxas de dados ampliadas para evolução do GSM
EV-DO	<i>Evolution Data Optimized</i>	Evolução de dados otimizada
FBMC	<i>Filtered Bank Multi-Carrier</i>	Múltiplas portadoras de bancos de filtros
FDD	<i>Frequency-Division Duplex</i>	Duplexação por divisão na frequência
FD-SHARC	<i>full duplex SHARing and Compatibility</i>	Compartilhamento e compatibilidade <i>full duplex</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>	Modulação em frequência
FOFDM	<i>Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais filtrada
FSS	<i>Fixed-Satellite Service</i>	Serviço de satélite fixo
GFDM	<i>Generalized Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais generalizada
GSM	<i>Groupe Special Mobile</i>	Grupo especial móvel
InH	<i>Indoor Hotspot</i>	Células pequenas internas
IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications 2000</i>	Telecomunicações móveis internacionais 2000
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications 2020</i>	Telecomunicações móveis internacionais 2020
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>	Telecomunicações móveis internacionais
INR	<i>Interference-over-Noise Ratio</i>	Razão interferência-ruído
IP	<i>Internet Protocol</i>	Protocolo de Internet
IS-95	<i>Interim Standard 95</i>	Padrão Interino 95

ITU	<i>International Telecommunications Union</i>	União Internacional de Telecomunicações
LOS	<i>Line of Sight</i>	Linha de visada
LTE	<i>Long Term Evolution</i>	Evolução de longo termo
LTE-A	<i>Long Term Evolution Advanced</i>	Evolução de longo termo avançada
LTE-U	<i>Long Term Evolution Unlicensed</i>	Evolução de longo termo não licenciada
NLOS	<i>No Line of Sight</i>	Sem linha de visada
MAC	<i>Medium Access Control</i>	Controle de acesso ao meio
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
PL	<i>Path Loss</i>	Perda de propagação
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexin</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais
RB	<i>Resource Block</i>	Bloco de recurso
RAS	<i>Radio Astronomy Service</i>	Serviço de radioastronomia
SHARC	<i>SHARing and Compatibility</i>	Compartilhamento e compatibilidade
SIC	<i>Self-Interference Cancellation</i>	Cancelamento de autointerferência
SLA	<i>Side-Lobe Attenuation</i>	Atenuação de lóbulos laterais
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>	Razão sinal-ruído
SNIR	<i>Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio</i>	Razão sinal-ruído-interferência
SMS	<i>Short Message System</i>	Sistema de mensagens curtas
TDD	<i>Time-Division Duplex</i>	Duplexação por divisão no tempo
TG 5/1	<i>Task Group 5/1</i>	Força tarefa 5/1
UE	<i>User Equipment</i>	Terminal de usuário
UFMC	<i>Universal Filtered Multi-Carrier</i>	Múltiplas portadoras universais filtradas
UMa	<i>Urban Macro</i>	Macro-Urbano
UMi	<i>Urban Micro</i>	Micro-Urbano
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	Sistema universal de telecomunicações móveis
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>	Acesso de alta velocidade a pacotes
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>	Fidelidade sem fio
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>	Interoperabilidade Mundial para Acesso de Micro-Ondas
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>	Rede sem fio de área local

WOFDM	<i>Windowed Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por divisão em frequências ortogonais janelada
WP 5D	<i>Working Party 5D</i>	Grupo de trabalho 5D
WRC15	<i>World Radiocommunication Conference 2015</i>	Conferência mundial de radiocomunicação 2015
WRC19	<i>World Radiocommunication Conference 2019</i>	Conferência mundial de radiocomunicação 2019
WRC	<i>World Radiocommunication Conference</i>	Conferência mundial de radiocomunicação

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

No atual cenário das comunicações móveis sem fio há uma demanda por taxas de dados cada vez mais altas. Projeções mostram que o tráfego global mensal de dados móveis deve chegar a 49 exabytes até 2021 [2], ou seja, mais de seis vezes superior ao valor obtido em 2016, de 7,2 exabytes [3]. Outras fontes estimam esse número em até 57 exabytes em 2020 e um crescimento exponencial nos anos subsequentes [4], chegando a 4.394 exabytes em 2030. Essa estimativa é movida não só pelo aumento do tráfego de dados por usuário, mas também pelo crescente número de usuários. Espera-se que, de 2020 a 2030 o número de inscrições em operadoras de telefonia móvel suba de 10,7 para 17,1 bilhões, com uma média de consumo de 257.1 gigabytes mensais por inscrição.

Serviços de vídeo e multimídia com altas taxas de dados, como *streaming* de vídeo e jogos online, são os principais responsáveis por esse aumento. Projeções mostram que, em 2022, aplicações de vídeo corresponderão a 82% do tráfego IP (*Internet Protocol*, protocolo de internet) global e aplicações de realidade virtual e realidade aumentada passarão por um crescimento de 12 vezes no mesmo período [5]. Outras causas do aumento do tráfego futuro incluem [4]:

- Aumento das comunicações entre máquinas: essas incluem veículos conectados, redes elétricas inteligentes e internet das coisas e podem chegar a 15 bilhões de conexões em 2022 [5].
- Maior número de aplicações de computação em nuvem: usuários estão, cada vez mais, adotando serviços de acesso ubíquo, como serviços de armazenamento de dados e mineração de dados.
- Substituição da banda-larga fixa por banda-larga móvel: comunicações sem fio devem se tornar uma alternativa viável a cabos e fibras óticas em vários cenários.
- Aumento dos centros urbanos: comunicações móveis sem fio são uma forma eficiente de se prover conectividade a centros urbanos densos. O aumento das grandes cidades, então, favorece o aumento de tráfego de dados móveis.

Mais do que taxa de dados, a evolução dos sistemas de comunicação celular se estende também à latência e confiabilidade. Com o objetivo de oferecer serviços de comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência [6], bem como comunicações entre máquinas [7], confiabilidade e latência também são variáveis a serem otimizadas por futuras redes de comunicação. Ainda assim, o aumento da demanda e das taxas de dados alcançadas é uma característica antiga do mercado de comunicações móveis, de forma que, operadoras de telefonia celular têm que estar sempre ampliando e atualizando suas redes com novas tecnologias e recursos. Em consequência, durante os anos, diversas gerações de tecnologias foram empregadas em faixas de frequência diversas. Tecnologias de quinta geração são o próximo passo na evolução das comunicações móveis.

1.1.1 Comunicações IMT-2020

Tendo em vista a projeção de crescimento do mercado de comunicações móveis e o surgimento de novas tecnologias no futuro, a UIT definiu o termo IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications 2020*, telecomunicações móveis internacionais 2020). A UIT refere-se às comunicações de quinta geração (5G) como IMT-2020, e as define como "sistemas móveis que incluem nova(s) interface(s) de rádio que suportam novos recursos para além de sistemas IMT-2000 e IMT-Advanced" [8]. Espera-se que sistemas IMT-2020 não só incorporem comunicações ultraconfiáveis e comunicações massivas entre máquinas, mas também permitam acesso avançado à banda larga móvel. Isso significa acesso à internet com altas taxas de dados e confiabilidade, baixa latência e alta eficiência espectral em regiões com alta densidade de usuários. Dessa forma, para serem caracterizadas como provedoras de acesso à banda larga móvel IMT-2020, novas tecnologias entrantes no mercado devem atender a uma série de requisitos mínimos. Entre eles, estão os valores mostrados na Tabela 1.1 [9].

Tabela 1.1: Requisitos de sistemas IMT-2020.

	Enlace de descida	Enlace de subida
Taxa de dados de pico	20 Gbps	10 Gbps
Taxa de dados percebida pelo usuário	100 Mbps	50 Mbps
Eficiência espectral máxima	30 bps/Hz	15 bps/Hz
Eficiência espectral do 5º percentil de usuários	0,225 bps/Hz	0,15 bps/Hz
Eficiência espectral média	7.8 bps/Hz	5.4 bps/Hz
Latência devido à camada física	4 ms	
Taxa de perda de pacotes	$< 10^{-5}$	
Mobilidade máxima do usuário	500 km/h	
Largura de banda máxima	1 GHz	

Apesar da utilização de novas tecnologias, redes de comunicações móveis devem fornecer taxas cada vez maiores, em longo e médio prazos, devido principalmente a avanços na eletrônica e na computação e a novos tipos de dispositivos e serviços. Para aumentar a capacidade, mais espectro será necessário. Sistemas celulares enfrentam uma escassez de banda [10], na qual as

operadoras utilizam congestionadas faixas entre 700 MHz e 2,6 GHz para oferecer serviços de diversas naturezas. A alocação global de espectro para tecnologias celulares não passa de 780 MHz [11], e as faixas de frequência disponíveis são disjuntas, com diferentes características de propagação.

Por isso, pesquisadores, indústria e administrações têm visto faixas de frequência mais altas, com comprimentos de onda da ordem de milímetros, como possíveis candidatas a abrigar esse tráfego extra. Na literatura, não existe convenção com relação à frequência específica dessas faixas, sendo atribuídas faixas de 3 a 300 GHz [10][12] ou somente faixas acima de 20 GHz [13]. Conhecidas como ondas milimétricas, elas se tornaram viáveis para as comunicações móveis devido a recentes avanços na eletrônica [14][15][16] e no projeto de antenas [17][18]. Além de estarem menos ocupadas, essas frequências também permitem transmissões com maiores larguras de banda e, conseqüentemente, maiores taxas.

1.1.2 Regulamentação de espectro para o IMT-2020

Uma vez que ondas milimétricas serão um dos componentes das comunicações IMT-2020, a UIT já identificou um total de 32.5 GHz de possível espectro para comunicações de quinta geração nas faixas de 24,25 a 27,5 GHz; 31,8 a 33,4 GHz; 37 a 43,5 GHz; e 81 a 86 GHz, por exemplo [19]. O tratado que regula o uso global de espectro, o *Radio Regulations* (RR ou Regulamentações de Rádio) [20], será revisado na WRC19 (*World Radiocommunication Conference 2019*, conferência mundial de radiocomunicação 2019), que acontecerá em *el-Sheikh*, no Egito, em outubro e novembro de 2019, de forma a incorporar as identificações de frequência para o IMT-2020 [21].

Conferências mundiais de radiocomunicação acontecem a cada três ou quatro anos e têm como objetivo "rever e, se necessário, revisar o *Radio Regulations*"[21]. Delegações de estados membros podem debater possíveis mudanças nas regulamentações de rádio e, havendo consenso, emendas a partes específicas das regulamentações são aprovadas. Revisões são executadas com base em uma agenda aprovada pelo conselho da UIT, na qual cada tópico específico corresponde a um item de agenda. Esse processo envolve múltiplos grupos de estudo e seus respectivos grupos de trabalho, responsáveis por preparar estudos para a WRC. O Grupo de Estudo 5, por exemplo, estuda comunicações terrestres, como a fixa e a móvel [22]. Baseados nos estudos gerados pelos grupos de estudo, estados membros e membros de setores preparam um relatório que consolida o resultados alcançados e propõe ações para cada item de agenda [23].

O Item de Agenda 1.13 lida com a "identificação de faixas de frequência para o desenvolvimento futuro de Comunicações Móveis Internacionais (IMT)"[24]. A decisão de quais frequências alocar ao IMT-2020, a ser tomada na WRC19, torna-se ainda mais difícil quando se levam em consideração os serviços já alocados nas faixas em estudo. Eles incluem serviços de enlaces fixos, radioastronomia, satélite e radionavegação, por exemplo. Estudos que visam determinar a viabilidade do compartilhamento de frequência entre serviços diferentes, chamados de estudos de compartilhamento, se mostram necessário para se levantar o nível de interferência causado pelo sistema entrante aos sistemas existentes no mercado. Estudos nos quais os sistemas não compartilham a mesma faixa, mas ainda assim têm o potencial de causar interferência uns aos outros, são

chamados de estudos de compatibilidade e também são relevantes para se determinar o impacto de um sistema novo em bandas de frequência adjacentes à dele. O termo "estudos de convivência" é comumente utilizado como um termo geral que se refere tanto a estudos de compartilhamento como de compatibilidade.

Com o propósito de realizar estudos de compartilhamento e compatibilidade entre o IMT-2020 e os serviços já alocados primariamente às faixas em estudo, o Grupo de Estudo 5 estabeleceu a Força Tarefa 5/1 (TG 5/1, *Task Group 5/1*) [25]. Grupos envolvidos foram convidados a submeter estudos ao TG 5/1, sendo um desses grupos o Grupo de Trabalho 5D (WP 5D, *Working Party 5D*), responsável pelo levantamento dos parâmetros técnicos de sistemas IMT [26].

Dessa forma, o WP 5D desenvolveu a recomendação ITU-R M.2101 [27], que fornece diretrizes para modelagem e simulação de sistemas IMT para estudos de convivência e compatibilidade. Levando em consideração essa recomendação, bem como os critérios de proteção estabelecidos por diversos grupos de trabalho, o TG 5/1 concluiu os estudos e desenvolveu o relatório preparatório para a WRC19. Para tanto, estudos de convivência do IMT com diversos sistemas foram conduzidos, dentre esses se destacam os serviços de satélite fixos (FSS, *Fixed Satellite Service*), de radioastronomia (RAS, *Radio Astronomy Service*), serviços fixos e de radionavegação.

Nesse trabalho são estudados os sistemas de satélite fixos e de radioastronomia. Serviços de satélite fixo são definidos como serviços de comunicação com estações terrestres empregando pelo menos um satélite, geoestacionário ou não [20]. Esse serviço inclui, por exemplo, sistemas satelitais de televisão ou rádio, telefonia, georreferenciamento e comunicações de dados. Com diversas alocações primárias em faixas de ondas milimétricas, o serviço de satélite fixo pode vir a compartilhar diversas faixas de frequência com o IMT-2020. A Tabela 1.2 mostra as faixas alocadas ao serviço de satélite fixo na Região 2 (Américas e parte do Pacífico) que se sobrepõem às faixas em estudo para o IMT-2020.

Estações de radioastronomia monitoram frequências de rádio específicas, de forma a detectar emissões de corpos celestiais distantes. A faixa de 42.5-43.5 GHz, por exemplo, é utilizada para detectar emissões de monóxido de silício de galáxias e nebulosas [28]. Como essas emissões são muito fracas, estações de radioastronomia tendem a ser muito suscetíveis a interferência, especialmente quando realizando medidas em uma faixa larga de frequências. Sendo assim, possíveis estações IMT-2020 operando na mesma faixa de frequência que o serviço de radioastronomia podem lhe causar interferência danosa mesmo quando estiverem relativamente longe do lóbulo principal de sua antena.

1.1.3 O simulador SHARC

O TG 5/1 definiu em [27] uma metodologia, baseada em simulações sistêmicas estáticas de redes sem fio, de forma a se estimar a interferência causada por redes IMT-2020 em outros serviços usando o mesmo espectro. Cenários de referência também foram especificados, de forma que estudos de diferentes instituições sejam comparáveis e aceitos por todos os participantes das discussões regulatórias. Os estudos devem seguir uma metodologia de Monte Carlo na qual, durante cada

Tabela 1.2: Sobreposição entre faixas alocadas ao FSS e RAS e faixas em estudo para o IMT-2020.

Faixas em estudo para o IMT-2020	Faixas alocadas para o FSS (Terra para espaço)	Faixas alocadas pra o FSS (espaço para Terra)	Faixas alocadas pra o RAS
24,25 - 27,5 GHz	24,75 - 25,25 GHz 27 - 27,5 GHz	—	—
31,8 - 33,4 GHz	—	—	31,5 - 31,8 GHz
37 - 43,5 GHz	42,5 - 43,5 GHz	37,5 - 42,5 GHz	42,5 - 43,5 GHz
45,5 - 50,2 GHz	47,2 - 50,2 GHz	—	—
50,4 - 52,6 GHz	50,4 - 51,4 GHz	—	—
66 - 76 GHz	—	71 - 76 GHz	—
81 - 86 GHz	81 - 86 GHz	—	81 - 86 GHz

iteração, um número de estações IMT-2020 é distribuído na área de estudo e o nível de interferência agregada gerada por todas essas estações no outro sistema é computado.

De forma a contribuir ativamente com os estudos do TG 5/1, a Divisão de Espectro, Órbita e Radiodifusão da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) tem desenvolvido, em parceria com a Universidade de Brasília, o Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e membros da indústria o simulador SHARC [19]. A ferramenta permite estudos de compartilhamento e convivência (*SHARing and Compatibility*) entre o IMT e outros serviços de radiocomunicação, de acordo com as diretrizes da recomendação ITU-R M.2101.

Sendo equipado para analisar a coexistência do IMT-2020 com serviços de satélite fixo, radioastronomia, enlaces fixos ponto-a-ponto, radionavegação, plataformas de alta altitude e outros sistemas, SHARC conta com diversos elementos básicos de simuladores sistêmicos, como conformação de feixe, controle de potência e escalonamento de recursos. Como um dos principais desenvolvedores do simulador SHARC, o autor desse trabalho realizou as contribuições listadas no Anexo I para o projeto SHARC. O código fonte do simulador SHARC pode ser encontrado em [29].

1.1.4 Comunicações *full duplex*

Uma das possibilidades para se aumentar a capacidade das redes de comunicações móveis é o *full duplex* (comumente abreviado para FD), que permite que estações transmitam e recebam informações ao mesmo tempo e no mesmo canal. Essa tecnologia foi considerada impraticável por muitos anos, uma vez que a transmissão da estação operando em *full duplex* interfere com o sinal recebido, podendo reduzir a razão sinal-ruído-interferência em mais de 100 dB. Recentes avanços na supressão dessa autointerferência, entretanto, têm trazido o *full duplex* à luz como uma tecnologia com o potencial para dobrar a capacidade dos enlaces de comunicação [30].

O *full duplex* causa, no entanto, mais interferência sistêmica [31], o que coloca em xeque a possibilidade de ele aumentar a capacidade da rede como um todo. Mais do que isso, o *full duplex* causa mais interferência em estações de outros sistemas operando na mesma frequência, como será explicado mais adiante. Por isso, este trabalho utiliza uma modificação do simulador SHARC, capaz de realizar estudos de convivência também com redes IMT-2020 operando em *full duplex*. O

código fonte do simulador pode ser encontrado em [32].

1.2 Definição do problema

Dado o que foi discutido na seção anterior, para que novas faixas sejam alocadas ao IMT-2020, estudos de convivência entre o IMT-2020 e o serviço de satélite fixo são necessários. O objetivo desses estudos é determinar se o nível de interferência causado pelo serviço entrante (o IMT-2020) será danoso às estações do existente, caso eles venham a compartilhar alguma faixa de frequência. Para tanto, a interferência é comparada com critérios de proteção estabelecidos pela UIT para o funcionamento correto dos sistemas existentes. Em caso de compartilhamento com o serviço de satélite fixo, tanto a estação espacial como a estação terrestre estarão sujeitas à interferência do IMT-2020, que pode operar tanto em *half duplex* (abreviado para HD) como em *full duplex*. Estudos como esse são muito úteis na elaboração de regulamentações e alocações de radiofrequência. Sendo assim, a questão problema que esse trabalho tenta responder é:

Em que condições o compartilhamento de frequência entre redes de telefonia móvel de quinta geração e os serviços de satélite fixo e radioastronomia é possível?

1.3 Objetivos do trabalho

Para se responder à questão problema, é definido o objetivo geral de se:

Levantar o nível de interferência que redes IMT-2020 causarão em sistemas satelitais e de radioastronomia em diversos possíveis cenários e compará-lo com os critérios de proteção definidos para esses sistemas.

Com os seguintes objetivos específicos:

1. Por meio de revisão da literatura, apresentar e discutir as tecnologias previstas para fazer parte de redes de comunicação IMT-2020, bem como as metodologias sugeridas pela UIT para realização de estudos de convivência entre redes IMT-2020 e serviços existentes;
2. Participar do desenvolvimento de um simulador sistêmico para estudos de convivência seguindo as recomendações e metodologias sugeridas pela UIT;
3. Realizar simulações do IMT-2020 operando em *full duplex* variando:
 - Topologia da rede IMT-2020;
 - Cancelamento de autointerferência;
 - Distribuição de carga da rede;
 - Tipo de antena utilizada pelas estações.

4. Realizar simulações de convivência entre o IMT-2020 e o serviço de satélite fixo (estação espacial, terrestre e terminal de usuário) e o serviço de radioastronomia variando:
 - Ângulo de elevação da estação espacial do serviço de satélite fixo;
 - Distância entre a rede IMT-2020 e a estação terrestre do serviço de satélite fixo de radioastronomia;
 - Tipo de duplexação do IMT-2020 (*half duplex* ou *full duplex*);
 - Distribuição de carga na rede IMT-2020;
 - Topologia da rede IMT-2020.

Como objetivo secundário, este trabalho também visa a avaliar a viabilidade do *full duplex* como forma de se aumentar a vazão de redes IMT-2020. Assim, os cenários nos quais o *full duplex* será provavelmente implementado serão levantados e utilizados nos estudos de convivência subsequentes. Além disso, este trabalho apresenta a contribuição de avaliar a interferência extra que o IMT-2020 operando em *full duplex* causa nos serviços de satélite fixo e radioastronomia, avaliação esta que, dentro do conhecimento do autor, não se encontra na literatura.

1.4 Apresentação do manuscrito

O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura pertinente aos objetivos supracitados. Ela se inicia com uma introdução às comunicações IMT-2020 e suas tecnologias, como ondas milimétricas, formas de ondas empregadas, MIMO e conformação de feixe e o *full duplex*. No que tange ao *full duplex*, são levantados trabalhos que estudam o cancelamento de autointerferência, a viabilidade sistêmica e os níveis de interferência que ele causa em outros sistemas. Em seguida, o serviço de satélite fixo é descrito, a definição oficial da UIT para esse sistema é apresentada e alguns casos de uso são listados. Também são discutidos estudos de compartilhamento entre o serviço de satélite fixo e o IMT-2020 presentes na literatura.

A ferramenta de simulação utilizada é descrita no Capítulo 3. Nele são explicadas a metodologia de simulação e a modelagem das estações dos sistemas em questão, sendo elas as estações base e terminais de usuário do IMT-2020 e as estações espacial e terrestre do serviço de satélite fixo. No Capítulo 4, por sua vez, são apresentados os resultados das simulações referentes ao *full duplex*, sendo feita a análise das condições de viabilidade dessa tecnologia. No Capítulo 5, são realizados estudos de convivência do IMT-2020 com o sistemas de satélite fixo, nas faixas de 27-27.5 GHz para o enlace de subida do FSS e 37-42.5 GHz para o enlace de descida do FSS, e o sistema de radioastronomia, na faixa de 42.5-43.5 GHz. Dessa forma, cada um dos Capítulos de 2 a 5 está associado a um dos objetivos específicos do trabalho. Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas conclusões finais sobre o trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta um apanhado geral dos trabalhos relevantes para as discussões dos próximos capítulos. Primeiramente, comunicações IMT-2020 são apresentadas, junto com seus principais casos de uso. Algumas das tecnologias previstas para integrar o IMT-2020 são descritas, sendo elas: ondas milimétricas, formas de onda baseadas em OFDM, conformação de feixe e comunicações *full duplex*. Um destaque maior é dado ao *full duplex*, tecnologia que visa aumentar a capacidade do sistema IMT-2020 mas que, por consequência, aumenta a interferência gerada pelo sistema. Por isso, o *full duplex* tem o potencial de impedir o compartilhamento de frequência entre o IMT-2020 e outros serviços, como o de satélite fixo e radioastronomia. Neste capítulo, também é feita a descrição desses sistemas, além de serem apresentados estudos de convivência deles com o IMT-2020 encontrados na literatura.

2.2 Comunicações IMT-2020

Comunicações IMT-2020 têm o potencial de abarcar diversas novas tendências de mercado utilizando-se de bandas na faixa de ondas milimétricas, maiores graus de liberdade espacial com o uso de painéis de antenas e MIMO tridimensional, densificação de redes, formas de onda com divisão de frequências ortogonais que garantem escalabilidade e flexibilidade e tecnologias *full duplex*, sendo essas apenas algumas possibilidades dentre muitas. Das tecnologias em voga para o 5G, no entanto, algumas já foram incorporadas ao padrão [33], como é o caso do OFDM, enquanto outras ainda não fazem parte do horizonte de padronização mas podem vir a ser implementadas em versões mais maduras do padrão, como é o caso do *full duplex*. Independente do estágio de padronização, as tecnologias pertinentes a este trabalho são abordadas neste capítulo.

De forma flexível e adaptativa, espera-se que o núcleo das redes de quinta geração forneça suporte otimizado para diversos tipos de aplicação, sendo eles:

- Comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência [6]: com aplicações em veículos autônomos,

automação industrial, realidade aumentada e virtual, controle remoto e *e-health*. Essas aplicações demandam baixíssimos atraso (menos de 1 ms) e perda de pacotes (abaixo de 10^{-7}), por se tratarem de atividades críticas e de alta sensibilidade;

- Comunicações massivas entre máquinas [7]: com aplicações em sensores, dispositivos de rastreamento e medidores. Aplicações futuras incluem redes elétricas inteligentes, georreferenciamento e comunicações industriais, nas quais haverá uma grande densidade de estações (até dez vezes mais do que a quantidade atual de estações móveis em redes celulares) transmitindo a baixas taxas de dados;
- Comunicações móveis de banda larga [34]: se trata do cenário mais desenvolvido na literatura, no qual usuários requerem banda larga a altas taxas de dados com alta mobilidade em cenários urbanos densos. Aplicações que se destacam são *streaming* de vídeo e áudio de alta qualidade, jogos *online* e acesso a serviços em nuvem.

O IMT-2020 também visa a atender às demandas dos cenários descritos acima de forma sustentável [35], consumindo menos energia do que seus antecessores e reduzindo os impactos ambientais causados pela engenharia de comunicações. Este trabalho foca em comunicações móveis de banda larga, embora vários dos conceitos discutidos aqui se estendam às demais aplicações do IMT-2020.

Avanços recentes na direção de criar as primeiras redes de quinta geração têm ganhado destaque na mídia e literatura. Em [36], por exemplo, testes na faixa de 3,5 GHz mostraram a possibilidade de se alcançar latências de transmissão na ordem de 1 ms e taxas de 1 Gbps, utilizando-se de conceitos de telefonia IMT-2020. Testes realizados em Tóquio, Japão, empregaram MIMO massivo na frequência de 4,5 GHz para obter resultados semelhantes na frequência de 4,5 GHz em áreas urbanas densas [37]. Também existem exemplos de testes nas faixas de ondas milimétricas, a serem apresentados na próxima seção.

2.2.1 Ondas milimétricas

Atualmente, operadoras de telefonia móvel estão restritas a faixas de frequência entre 700 MHz e 2,6 GHz para atender à crescente demanda por conectividade. O aumento no número de usuários também dificulta a entrega de conectividade de alta qualidade com baixa latência, uma vez que o espectro eletromagnético disponível está se tornando cada vez mais escasso [10]. Além disso, atender aos requisitos estabelecidos para comunicações IMT-2020 deve requerer maiores larguras de banda [38] e muitas das faixas alocadas à telefonia móvel não são contínuas. Por isso, novas faixas de espectro estão em estudo para serem alocadas à telefonia móvel e, mais especificamente, ao IMT-2020.

Uma porção do espectro que tem atraído atenção é a faixa de ondas milimétricas. Estudos indicam que essas faixas são candidatas viáveis a espectro para comunicações IMT-2020. A combinação de tecnologias CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*, em português semicondutor de metal-óxido complementar) de baixo custo, capazes de operar bem na faixa de ondas milimétricas, com antenas de alto ganho e fácil apontamento fortalece a viabilidade de ondas milimétricas

[11]. Além disso, alocações de portadoras em ondas milimétricas permitem canais de maior largura de banda do que os 20 MHz utilizados por sistemas de quarta geração [39].

Um dos desafios que surge ao se utilizar ondas milimétricas é a atenuação por chuva e por gases atmosféricos, que se mostra mais intensa nessas frequências do que em frequências tradicionais de telefonia móvel [11]. Diversos estudos mostram, no entanto, que para curtas distâncias (menos de 1 km) essas atenuações terão um efeito pequeno na propagação de ondas milimétricas [40]. Por isso, células pequenas também são candidatas a integrarem as comunicações IMT-2020. Células pequenas podem escoar o tráfego das macrocélulas, formando uma camada extra acima da camada principal da rede e reduzindo, efetivamente, a distância entre os usuários e a estação base que os serve. Com isso, é possível haver maior reuso de frequência, com maiores taxas de dados e eficiência energética, uma vez que haverá menos perdas de propagação [41].

Outros estudos mostram que a perda por penetração em prédios para ondas milimétricas pode chegar a mais de 40 dB [11], o que implica que estações *indoor* terão dificuldades em se conectar a estações externas. Nesse cenário, repetidores e pontos de acesso deverão ser instalados dentro de prédios para garantir a acessibilidade de usuários em edificações residenciais e comerciais. Em consequência, haverá uma separação entre redes internas e externas, o que pode aumentar ainda mais o reuso de frequência.

Testes na faixa de ondas milimétricas incluem, por exemplo, o trabalho descrito em [42], no qual foram avaliados *hotspots* móveis em trens de alta velocidade. A faixa de frequência estudada foi a de 25,5 GHz, na qual algoritmos de transferência dos *hotspots* entre estações base na margem da ferrovia foram estudados. Em [43] a faixa de 70 GHz foi testada em uma área urbana densa e em um *shopping center*, chegando a 2 Gbps de vazão na rede. Sendo assim, foi possível realizar a "primeira transmissão de vídeo em 8K em tempo real" usando esse tipo de tecnologia. O trabalho descrito em [44] usa a faixa de 94 GHz para implementar enlaces em ambientes *indoor*, utilizando MIMO e OFDM para tanto. Por fim, [45] realiza medidas e caracterização de canal em faixas entre 130 e 174,8 GHz, testando enlaces de até 325 m de comprimento.

2.2.2 Formas de onda

No que tange à interface aérea, comunicações IMT-2020 farão uso de formas de onda baseadas em OFDM [46]. Em tais formas de onda, existe uma multiplexação de dados tanto na frequência como no tempo, como mostra a Figura 2.1 b), uma vez que a banda total disponível é dividida em sub-bandas menores. Cada uma dessas sub-bandas transmite uma portadora, chamada de subportadora, e cada subportadora transmite um símbolo de dados modulado em fase e quadratura. Por isso, o OFDM é um tipo de transmissão em múltiplas portadoras.

Comparado com sistemas de portadora única, como na Figura 2.1 a), símbolos de dados em sistemas OFDM são transmitidos em paralelo na frequência, cada um em uma subportadora. Por isso, a unidade mínima de recurso em um sistema OFDM é o bloco de recurso: um símbolo de dados transmitido durante um tempo de símbolo em uma subportadora. Sistemas OFDM sempre respeitam a granularidade dos blocos de recurso ao alocar recursos entre os usuários da rede.

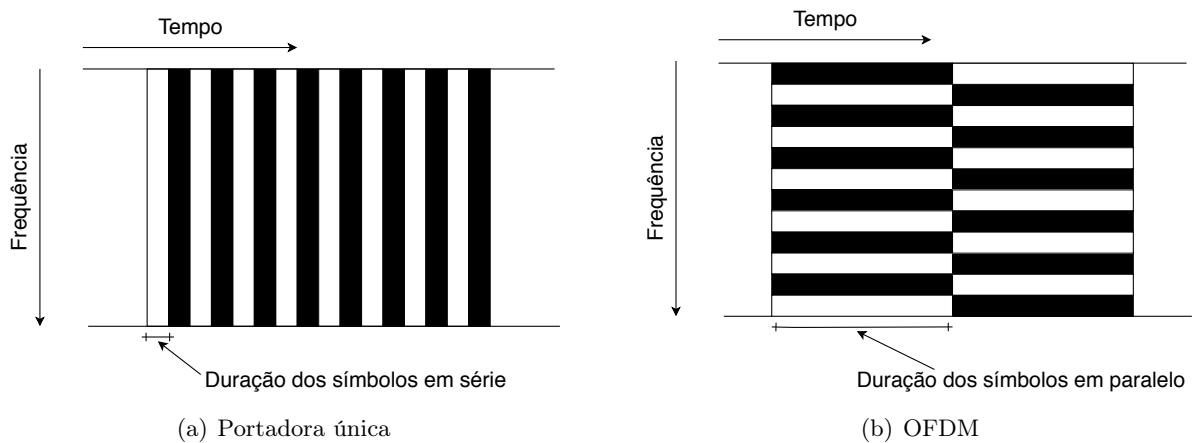


Figura 2.1: Organização dos símbolos de um sistema a) de portadora única e b) OFDM.

2.2.3 MIMO e conformação de feixe

Com a utilização de frequências mais altas e, conseqüentemente, comprimentos de onda menores, as antenas utilizadas, tanto para transmissão como para recepção, assumem tamanhos cada vez menores [41]. Isso possibilita a utilização de painéis com múltiplas antenas tanto nas estações base como nos terminais de usuário, ao que se dá o nome de MIMO. Entre as possibilidades proporcionadas pela utilização de MIMO em sistemas de comunicação estão: multiplexação espacial, aumento da diversidade dos enlaces e conformação de feixe.

Tecnologias MIMO podem não só mitigar o efeito da propagação em múltiplos percursos como podem se aproveitar desse tipo de propagação para alcançar taxas de transmissão mais altas [47]. Podem, também, usar uma combinação de múltiplas antenas com múltiplos percursos de propagação para adquirir conhecimento do canal de comunicações e, assim, utilizar a dimensão espacial do canal como mais um grau de liberdade. Dessa forma, enlaces podem alcançar taxas de dados significativamente maiores quando empregam MIMO [48]. Este grau de liberdade adicional também pode ser usado para se aumentar a diversidade do enlace, diminuindo assim a taxa de erro de bits [47]. A mesma informação pode ser transmitida simultaneamente em mais de um feixe espacial, o que garante ao receptor menos incerteza com relação ao que foi transmitido e, por consequência, reduz a probabilidade de erro de detecção.

Como descrito em [41], MIMO também permite a conformação de feixes de transmissão, de forma a se concentrar a energia na direção da estação receptora. Na recepção, também é possível aumentar o ganho efetivo do painel de antenas na direção do transmissor, o que aumenta a eficiência do enlace e reduz a interferência em estações adjacentes. A Figura 2.2 ilustra a conformação de feixes. Nela são mostradas duas células de três setores, nas quais a estação base emprega somente uma antena por setor (Figura 2.2(a)) ou múltiplas antenas por setor, com conformação de feixes (Figura 2.2(b)). No caso em que se usa conformação de feixes, a estação base emprega vários feixes estreitos por setor, um para cada estação conectada, o que reduz a interferência nas estações de outros setores ou em outras células. Os terminais de usuário também utilizam feixes apontando para a estação base que os serve.

No caso em que a conformação de feixes não é utilizada, somente um feixe por setor é empregado. Por isso, o diagrama de radiação da antena da estação base deve ser largo, de forma a cobrir todo o setor, e a interferência em estações de células vizinhas tende a ser maior. Com mais interferência, o reuso de frequência é comprometido e a capacidade da rede como um todo acaba prejudicada. Assim como as estações das células vizinhas, estações de outros sistemas operando na mesma frequência também são vítimas de menos interferência de sistemas IMT que empregam conformação de feixe.

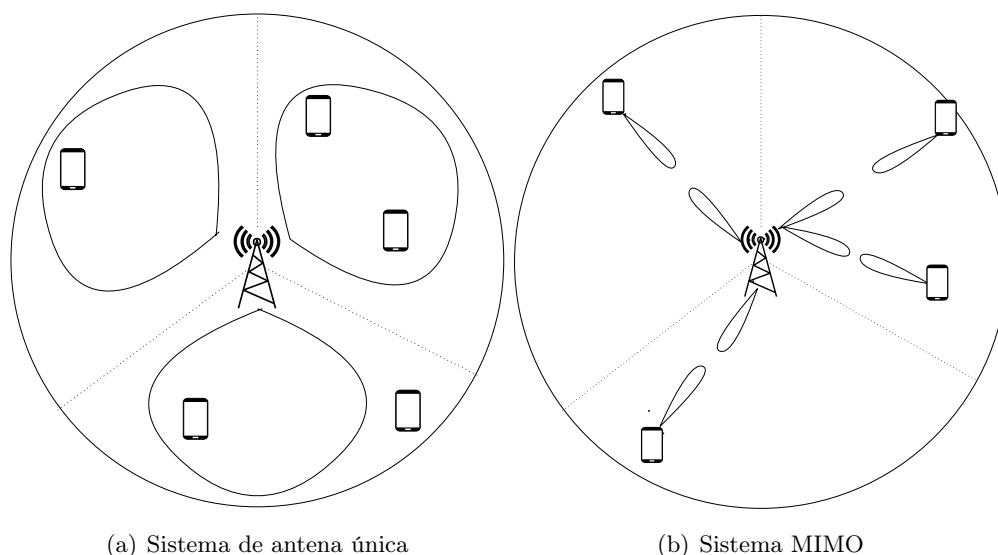


Figura 2.2: Sistemas a) de antena única e b) MIMO.

2.2.4 Comunicações *Full-Duplex*

Sistemas atuais de comunicação realizam duplexação de dados ou no domínio do tempo ou no da frequência. Isso significa que estações realizam a transmissão e recepção de dados ou ao mesmo tempo mas em frequências distintas, ao que se chama de duplexação na frequência (FDD, *frequency-division duplex*); ou na mesma frequência, mas em instantes de tempo distintos, ao que se chama de duplexação no tempo (TDD, *time-division duplex*). Realizar transmissão e recepção simultaneamente na mesma faixa de frequência significa adicionar a interferência extra do sinal transmitido à cadeia de recepção da estação, como será explicado mais adiante. Por esse motivo, atualmente, tecnologias de comunicação utilizam-se de duplexação no tempo ou na frequência, ou alguma combinação dos dois, para reduzir os níveis de interferência, com o ônus de se reduzir a capacidade da rede.

Em comunicações *full duplex*, estações podem transmitir e receber dados ao mesmo tempo na mesma frequência, o que, em princípio, dobra a capacidade da rede [30] [49] [50]. Se empregado em redes de comunicações móveis, um terminal de usuário pode operar tanto na direção de descida como na de subida ao mesmo tempo, recebendo e transmitindo dados para a estação base, no mesmo canal, o que aumenta a eficiência de utilização dos recursos de rádio. Estações base podem, também, receber informações de um usuário e transmitir para outro usuário no mesmo canal

simultaneamente, o que favorece a redução da latência na rede.

O *full duplex* pode ser bidirecional ou não bidirecional [51], [52], como ilustrado na Figura 2.3. Na Figura 2.3(a), tanto o terminal de usuário como a estação base operam em *full duplex*, o que significa que as transmissões de descida e de subida acontecem para o mesmo terminal de usuário na mesma frequência ao mesmo tempo. No entanto, como o *full duplex* exige uma significativa mudança no *hardware* das estações, com alto custo e consumo de potência [30], é mais prático empregar *full duplex* somente nas estações base [50] [53]. A estação base da Figura 2.3(b) emprega *full duplex*, enquanto os terminais de usuário não, de forma que os enlaces de descida e de subida acontecem simultaneamente, na mesma frequência mas para terminais de usuário diferentes. A esse tipo de duplexação dá-se o nome de *full duplex* não bidirecional ou *full duplex* de três nós.

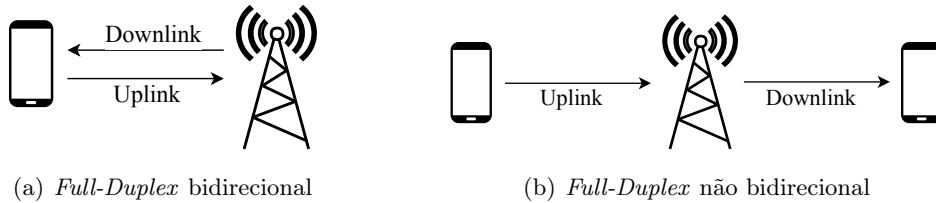


Figura 2.3: Tipos de enlace *full duplex*.

O *full duplex* foi, por muito tempo, considerado impraticável devido à forte autointerferência causada pelas transmissões simultâneas [52]. O sinal transmitido por uma estação interfere na sua cadeia de recepção quando operando em *full duplex*. O sinal do enlace de subida (*uplink*) da estação base da Figura 2.3(b), por exemplo, terá, como interferência adicional, o sinal de descida (*downlink*) da própria estação base, que pode exceder em mais de 100 dB o sinal recebido. Se não for tratada, essa autointerferência torna as comunicações *full duplex* inviáveis.

Outro desafio inerente às comunicações *full duplex* é a maior complexidade dos esquemas de alocação de recursos [54]. Em sistemas *half duplex*, a duplexação entre as direções de subida e descida pode ocorrer tanto no tempo como na frequência. Duplexação por divisão no tempo significa que as mesmas faixas de frequência são utilizadas para os enlaces de descida e subida mas há alocação de intervalos de tempo diferentes para cada direção. Quando a duplexação é por divisão em frequência, no entanto, faixas de frequência diferentes são usadas para as duas direções de enlace. Em redes que empregam o *full duplex* essa distinção se torna ainda mais complexa, podendo haver estações diferentes operando em *full duplex* ou em *half duplex* descida ou subida em um mesmo instante de tempo e na mesma frequência.

A principal dificultante da alocação de recursos em redes *full duplex* é a maior interferência causada pelas diversas transmissões simultâneas [55]. As Figuras 2.4(a) e (b) mostram duas células de uma rede operando em *half duplex* nas direções de descida e subida, respectivamente. Nestes casos, as estações receptoras sofrem interferência das estações transmissoras das células vizinhas, sendo que no caso de descida os terminais de usuário sofrem interferência das estações base das células adjacentes e no caso de subida as estações base sofrem interferência dos terminais de usuário de outras células. Em contraste, a Figura 2.4(c) mostra duas células operando em *full duplex* bidirecional. Como há mais estações transmitindo ao mesmo tempo, há mais interferência

entre elas, podendo haver diminuição da taxa alcançada em cada um dos enlaces individuais. O mesmo acontece para o *full duplex* de três nós, mostrado na Figura 2.4(d). Nele, no entanto, a autointerferência dos terminais de usuário é substituída pela interferência entre terminais da mesma célula.

Apesar desses desafios, avanços recentes em técnicas de cancelamento da autointerferência, bem como novas técnicas de alocação de recursos voltadas para o *full duplex*, têm indicado o *full duplex* como uma possível tecnologia a compor o IMT-2020. Tais avanços são abordados nas seções a seguir.

2.2.4.1 Autointerferência

Nos últimos anos, diversos trabalhos têm surgido com a proposta de diminuir os níveis de autointerferência sofridos por estações *full duplex*. Estes trabalhos se utilizam de técnicas de separação espacial das antenas de transmissão e recepção [56], design dos diagramas de radiação das antenas [57] e técnicas de processamento analógicas [58] e digitais [59] para cancelar a interferência gerada, na recepção, pelo sinal transmitido por uma estação *full duplex*. A referência [60], por exemplo, alcança um cancelamento de autointerferência (SIC, do inglês *Self-Interference Cancellation*) de até 45 dB em um sistema de antena única e 20 MHz de largura de banda utilizando um circuito de cancelamento analógico de alimentação direta.

Técnicas mais complexas, utilizando antenas diferentes para transmissão e recepção, podem chegar a níveis maiores de cancelamento, como é o caso do trabalho em [61], que alcança até 73 dB de cancelamento em canais OFDM de 10 MHz. Focado em redes WiFi, o artigo em [62] utiliza múltiplas antenas em uma configuração MIMO, cancelamento analógico e digital para chegar a um cancelamento da ordem de 85 dB. Canais LTE de 80 MHz são utilizados pela referência [58], também empregando MIMO, e neles são alcançados até 100 dB de cancelamento de autointerferência. A referência [63] ultrapassa esse valor, chegando a 110 dB de cancelamento, empregando cancelamento analógico e digital com adaptação dinâmica na camada física do padrão 802.11ac.

Nas faixas de ondas milimétricas, trabalhos como o presente em [64] também conseguem cancelar parte da autointerferência. Os autores utilizam separação espacial e mudança na polarização das antenas de transmissão e recepção para chegar a 37 dB de cancelamento em canais de 2 GHz de largura de banda e portadora centrada em 60 GHz. A referência [65], por sua vez, chega a mais de 70 dB de cancelamento, também em 60 GHz, e demonstra a viabilidade de links de 0,7 m de distância com razão sinal-ruído-distorção de 7,2 dB. Nessa faixa de 60 GHz, o cancelamento de 80 dB foi o maior já encontrado na literatura, em [66]. Para chegar a esse valor, os autores se utilizam de cancelamento passivo e ativo.

Tais valores de cancelamento de autointerferência, próximos de 100 dB, tornam viável a criação de nós *full duplex* em redes de comunicação, mas as técnicas utilizadas por esses trabalhos ainda são muito complexas para serem utilizadas em larga escala, especialmente em terminais de usuário. Por isso, o *full duplex* será possivelmente empregado, em um primeiro momento, somente nas estações base [30]. Como o *full duplex* requer mudanças significativas em *hardware*, além de ser

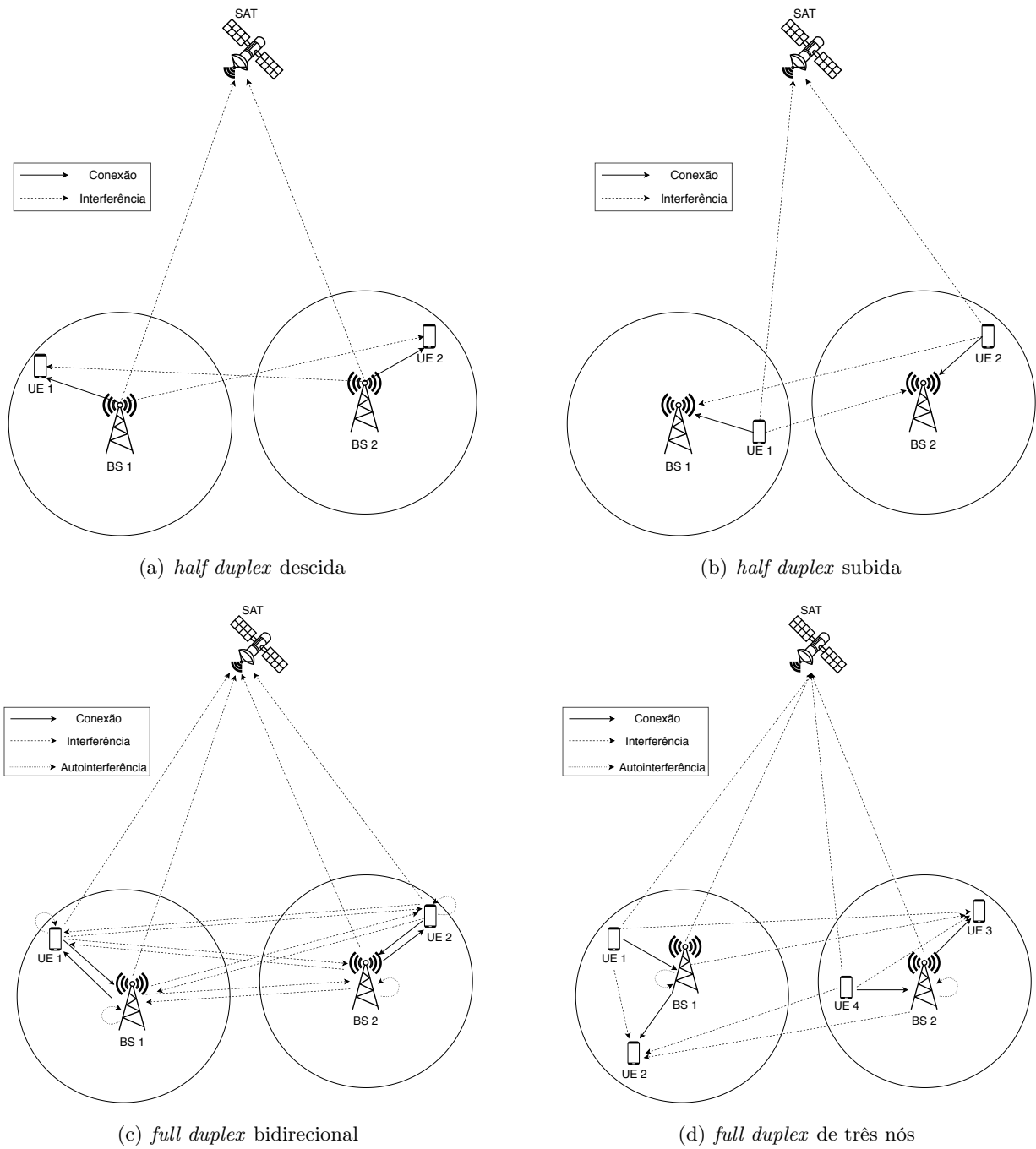


Figura 2.4: Interferência sistêmica em *half duplex* e *full duplex*.

mais caro e consumir maior potência do que o *half duplex*, é mais prático atualizar os elementos de infraestrutura antes de alterar os terminais de usuário. Técnicas de cancelamento de autointerferência não são o foco do trabalho apresentado aqui, no entanto, de forma que uma importância maior é dada à interferência sistêmica em redes *full duplex*, explicada a seguir.

2.2.4.2 Interferência sistêmica

Outro desafio inerente de redes *full duplex* é a maior interferência sofrida tanto pelas estações da rede como pelos sistemas que operam na mesma ou em uma frequência adjacente. Na Figura 2.4, por exemplo, tanto as estações da rede IMT como a estação satelital operando na mesma frequência (SAT) sofrem mais interferência quando a rede opera em *full duplex* do que quando ela opera em *half duplex*. Por isso, é importante se avaliar a interferência sistêmica dentro da rede *full duplex* para se identificar mecanismos de alocação de recursos que mitigam o impacto dessa maior interferência e, além disso, se levantar o nível de interferência extra causada pela operação em *full duplex* em outros sistemas.

No que tange à interferência dentro das redes *full duplex*, trabalhos detalhando possíveis implementações do controle de acesso ao meio (MAC, do inglês *medium access control*) comparam o ganho de vazão que o *full duplex* proporciona em relação ao *half duplex*. Considerando-se apenas um enlace bidirecional isolado, espera-se que esse ganho seja de 100%, uma vez que as estações serão capazes de transmitir e receber ao mesmo tempo. A interferência das demais estações da rede *full duplex*, no entanto, impede que o *full duplex* chegue de fato a dobrar a vazão, e, para que esse ganho seja o mais próximo de 100% possível, são necessários mecanismos de alocação de recursos mais sofisticados do que os de redes *half duplex*.

Diversos trabalhos tentam estimar o impacto dessa interferência extra em sistemas *full duplex*. a referência [67] usa geometria estocástica para avaliar os impactos da interferência na vazão e alcance de transmissão de redes *full duplex*. Os autores concluem que, utilizando técnicas de acesso ALOHA, o *full duplex* fornece um ganho de cerca de 40% em vazão, e enlaces de 100 m requerem 100 dB de cancelamento de autointerferência para ter um desempenho aceitável na faixa de frequência de 2 GHz. Já o trabalho em [68] chega a um ganho de 79% em um ambiente *indoor* com escalonamento perfeito, que minimiza a interferência. Os autores investigam o desempenho de cancelamento de autointerferência não-linear, e chegam a valores próximos de 106 dB em alguns casos.

Em [69] protocolos de acesso CSMA (do inglês *carrier sensing multiple access*, ou acesso múltiplo por sensoriamento de portadora) de redes WiFi são avaliados para redes *full duplex*. O trabalho realiza uma análise assintótica, avaliando o ganho de vazão do *full duplex* em comparação com o *half duplex* à medida que o número de usuários na rede tende a infinito, e a conclusão final é que o ganho se mostra abaixo de 100% para a grande maioria dos enlaces da rede. Isso se dá, segundo os autores, em razão de que o reuso espacial e a contenção assíncrona dificultarem o uso do *full duplex* para WLANs (*Wireless Local Area Networks*, redes sem fio de área local), uma vez que as estações competem com vizinhos diferentes e, frequentemente, não podem iniciar uma seção de comunicação *full duplex* ao mesmo tempo. O artigo da referência [51] faz uma apanhado geral

de vários mecanismos de alocação de recursos para WLANs descritos na literatura e alguns dos mecanismos avaliados de fato conseguem dobrar a capacidade dos enlaces de alguns usuários, mas todos se tornam menos eficientes à medida que mais usuários são introduzidos na rede.

Os trabalhos [30] e [58] avaliam o ganho do *full duplex* para redes celulares. O primeiro, propõe um esquema de escalonamento híbrido, que pode agendar tanto transmissões *full duplex* como *half duplex*. Empregando *full duplex* somente nas estações base, objetivo é aumentar a taxa da rede como um todo, sem criar um cenário injusto, onde o ganho em vazão das células operando em *full duplex* é adquirido em detrimento das células operando em *half duplex*. Para isso, é otimizada, através de programação geométrica, uma função custo baseada em taxa e proporcionalidade. A vazão total da rede, ao usar *full duplex*, chega próxima do dobro da vazão com *half duplex*, especialmente com cancelamento de autointerferência ideal. Ainda assim, a eficiência energética das transmissões cai drasticamente, devido à maior interferência sistêmica. Os autores sugerem, como medidas para se aumentar essa eficiência, usar terminais de usuário com *full duplex* e criar penalizações para transmissões com altas potências. O trabalho, no entanto, não considera direcionalidade nas transmissões empregando antenas omnidirecionais em todas as estações.

O artigo na referência [58], por sua vez, avalia estações empregando MIMO e com dois tipos de tráfego: de *buffer* cheio e de transferência de arquivos. Para situações típicas de redes de microcélulas indoor e com 100% de chance de que duas estações estabeleçam um enlace *full duplex*, em vez de um *half duplex*, o ganho em vazão alcançado é de cerca de 93% em comparação com o *half duplex*. Esse ganho se aproxima de 100% à medida que se aumenta o isolamento entre as células, mas só chega de fato a 100% em situações muito específicas: com cancelamento de autointerferência perfeito, com células muito isoladas, com modelagem de tráfego de *buffer* cheio e com tráfego simétrico entre os enlaces de subida e descida.

Poucos trabalhos estudam os ganhos sistêmicos do *full duplex* nas faixas de ondas milimétricas. Um deles é o artigo na referência [70], no qual o desafio de se estimar o canal de autointerferência é avaliado em simulações de enlace e sistêmicas. Os autores optam por utilizar cancelamento de interferência passivo, através da separação de antenas de transmissão e recepção e da geração de nulos entre as antenas, através de conformação de feixes. Embora os ganhos do *full duplex* comparado com o *half duplex* não sejam levantados, os autores constatarem que "mesmo havendo *full duplex* somente nas estações base em um cenário de comunicações móveis em ondas milimétricas, o *full duplex* ainda pode ser benéfico".

Vale ressaltar que, como não há escassez de banda nas faixas de ondas milimétricas, a utilização do *full duplex* se mostra mais urgente em faixas mais baixas de frequência. Ainda assim, na medida em que a tecnologia for amadurecendo e o mercado de comunicações móveis aumentando, eventualmente haverá a necessidade de se aumentar a capacidade também em faixas de frequências mais altas e análises como as realizadas neste trabalho serão úteis para se empregar o *full duplex* em ondas milimétricas.

2.2.5 Convivência com outros sistemas

Alguns trabalhos, como [71] e [72], avaliam a coexistência entre nós *full duplex* e *half duplex* em uma mesma rede, com o objetivo de proteger estações "legado" *half duplex* da maior interferência gerada por estações *full duplex* entrantes na rede. Há poucos trabalhos, no entanto, que avaliam a interferência do *full duplex* em outros sistemas operando na mesma faixa ou em faixas de frequência adjacentes. Desses, a maioria propõe a utilização do *full duplex* como forma de se sensoriar o canal enquanto se realizam transmissões.

O trabalho na referência [73] é um desses e foca em redes de rádio cognitivo baseadas em contenção. Os autores propõem um modelo de acesso ao meio que utiliza o *full duplex* para sensoriamento espectral e acessa as faixas disponíveis sem a necessidade de sincronização entre as estações da rede. Mais do que isso, com a otimização da potência de transmissão e do tempo de sensoriamento, usuários secundários podem transmitir com maior potência e usar o *full duplex* para sensoriar o meio, de forma a não causar interferência danosa a usuários primários. Com isso, a rede de rádio cognitivo chega quase ao dobro da vazão quando comparada com um esquema *half duplex*.

A referência [74] também propõe que o *full duplex* seja utilizado para sensoriamento do canal, dessa vez para estações WiFi convivendo com redes LTE-U (do inglês *Long Term Evolution Unlicensed*, evolução de longo termo não licenciada). Essa tecnologia impede colisões de transmissão entre os sistemas e garante um funcionamento mais eficiente de ambas as redes. Tanto que, ao se utilizar o sistema de acesso ao meio e troca entre modo de operação *half duplex* e *full duplex* proposto pelos autores, a vazão das duas redes aumenta e a justiça entre o WiFi e o LTE-U é mantida.

2.3 O serviço de satélite fixo

De acordo com as regulamentações de rádio da UIT [20], artigo 1.21, serviço de satélite fixo é "um serviço de rádio comunicações entre estações terrestres em determinadas posições, quando um ou mais satélites são usados". Esses serviços incluem, por exemplo, enlaces satelitais de alimentação de transmissões de televisão e rádio, telefonia e comunicações de dados. Três tipos de estação se destacam no serviço de satélite fixo: a estação terrestre *gateway*, a estação espacial e o terminal de usuário. Os *gateways* servem de porta de entrada e saída de dados da rede satelital, sendo comumente conectados a redes externas por meio de fibra óptica. Empregam, em geral, antenas de grande porte e alto ganho, e têm a posição conhecida pelas operadoras de satélites e agências regulatórias.

A estação espacial, ou satélite, pode ser geoestacionária ou não geoestacionária e retransmite o sinal irradiado pelo *gateway* para os terminais de usuário na superfície da Terra. Os terminais de usuário, por sua vez, empregam antenas de pequeno porte, com menor diretividade, e tendem a ter a posição dentro da área de cobertura desconhecida. Usuários podem escolher posicionar suas estações no topo ou lateral de prédios sem necessariamente informar agências regulatórias de suas

decisões. Neste trabalho, exceto quando especificado o contrário, o termo "estação terrestre" se refere exclusivamente as estações do tipo *gateway*.

O Artigo 5 da regulamentação de rádio determina as frequências específicas alocadas ao serviço de satélite fixo e, dentre elas, estão faixas sob estudo para o IMT-2020, como as faixas de 40 a 40,5 GHz, destinada a comunicações do espaço para a Terra; e 27 a 27,5 GHz, para comunicações da Terra para o espaço. Estudos de convivência avaliando a possibilidade de compartilhamento de frequência entre os dois sistemas são descritos a seguir.

2.3.1 Compartilhamento e convivência com o IMT-2020

Os trabalhos [75] e [76] investigam a faixa de 27,5 a 28,35 GHz e concluem que o IMT-2020 não vai gerar interferência danosa à estação espacial nessa faixa. Esses estudos, no entanto, não utilizam as metodologias e parâmetros recomendados pela UIT, descritos na recomendação ITU-R M.2101 [27]. Essas metodologias foram apresentadas na Seção 1.1.2 e serão descritas no Capítulo 3. Já o trabalho na referência [77] segue as diretrizes estabelecidas, e os autores concluem que "a estação espacial está segura de interferência agregada do IMT-2020" na faixa de 27 a 27,5 GHz. Eles também estimam a interferência que a estação terrestre causaria no sistema IMT e definem uma distância de proteção que garante a convivência entre os sistemas.

O artigo da referência [78] foca na estação terrestre causando interferência na rede IMT na faixa de 28 GHz. A queda de vazão da rede IMT em função da interferência da estação terrestre é avaliada e, em alguns casos, ela chega a mais de 250 Mbps. Já a interferência do IMT na estação terrestre é avaliada em [79], onde um algoritmo de alocação cooperativo é proposto para a rede IMT operando junto com a estação terrestre na faixa de 18 GHz. O objetivo do algoritmo é coordenar as transmissões dos usuários de forma a reduzir a interferência na estação terrestre e, com ele, o IMT não causa interferência danosa ao serviço de satélite fixo.

A referência [80] analisa a interferência do IMT na estação espacial na faixa de 28 GHz e conclui que o satélite está protegido de interferência danosa em todos os casos avaliados. Por estar localizado em órbita, o satélite sofre pouca interferência do IMT-2020, mesmo quando se consideram grandes áreas de cobertura, e não há necessidade de coordenação para que haja convivência. No que tange às estações terrestres, o trabalho conclui que as distâncias de separação que garantem a convivência entre os sistemas variam de 50 m a 28 km, a depender do tipo de estação terrestre analisado.

2.4 A radioastronomia

O serviço de radioastronomia tem requisitos peculiares de frequência, necessitando de faixas espaçadas em oitavas entre si [81], de forma que cada faixa se encontra em frequência central igual ao dobro da frequência central da faixa anterior. Mais do que isso, medidas em faixa contínua realizam varreduras em amplas larguras de banda, podendo chegar a mais de 1 GHz. Isso significa que emissões espúrias e fora de faixa de uma rede IMT também devem ser consideradas no cálculo

da interferência agregada recebida por uma estação de radioastronomia nas proximidades. Embora existam poucos estudos de convivência do IMT-2020 com a radioastronomia na literatura, um estudo em particular é explicado a seguir.

2.4.1 Compartilhamento e convivência com o IMT-2020

O estudo realizado em [82] apresenta simulações nas faixas de 24 e 26 GHz e propõe um novo paradigma de compartilhamento entre redes móveis e radioastronomia. Sugere-se o acesso ao espectro em três fases, sendo a primeira somente para as redes móveis, a segunda compartilhada entre os dois sistemas e a terceira alocada somente para a radioastronomia. Os resultados de simulação alcançados mostram que, ao custo de uma pequena redução da vazão de dados, as redes móveis podem conviver com a radioastronomia. Nos cenários estudados, as estações do serviço passivo realizam acesso ao espectro com significativa redução da interferência recebida.

Nenhum dos trabalhos aqui citados, no entanto, avalia a interferência que o IMT-2020 operando em *full duplex* causa no serviço de satélite fixo ou na radioastronomia. Como o *full duplex* é, potencialmente, uma tecnologia integrante do IMT-2020 e como ele causa, como característica, uma maior interferência em sistemas com os quais compartilha a mesma frequência, é imprescindível a avaliação de sua viabilidade de um ponto de vista de convivência. Sendo assim, os próximos capítulos tentam quantificar essa interferência e avaliar a possibilidade de convivência por meio de uma ferramenta de simulação.

Capítulo 3

Metodologia de Simulação

3.1 Introdução

Neste capítulo, a metodologia de simulação, acompanhada do diagrama de blocos do simulador, é descrita, e cada uma de suas etapas é explicada separadamente. Além disso, os detalhes da modelagem das estações da rede IMT (estações base e terminais de usuário) como: topologia, distribuição das estações, diagramas de radiação e modelos de propagação, são apresentados no contexto da simulação. Por fim, são apresentados também os detalhes da modelagem dos três tipos de estação do serviço de satélite fixo (a estação espacial, a estação terrestre e o terminal de usuário) e a estação de radioastronomia. Mais uma vez, as particularidades dessas estações são exploradas e os indicadores de desempenho para cada uma delas são definidos.

3.2 O simulador

Como comentado anteriormente, a ferramenta de simulação utilizada nesse trabalho, o FD-SHARC, é baseada no simulador SHARC, desenvolvido pela Anatel em parceria com a academia e a indústria. Trata-se de um simulador estático, no qual são executadas diversas iterações, chamadas de *drops* ou *snapshots* de simulação. Durante cada iteração, o simulador sorteia posições aleatórias para as estações IMT e, com isso, é capaz de coletar resultados para uma ampla variedade de cenários. Sendo assim, os indicadores de desempenho coletados incluem tanto os piores quanto os melhores casos, dado que é simulado um número suficiente de iterações. Os detalhes do fluxo de simulação são descritos à seguir.

3.2.1 Fluxo de simulação

A Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos do simulador. Uma vez iniciada a simulação, as estações, tanto do sistema IMT como do sistema interferido, são distribuídas. Em seguida, uma porcentagem fixa de células do sistema IMT é ativada. Essa porcentagem é chamada de fator de carga e representa a proporção de células que foram alocadas para transmissão no instante de

tempo da iteração. Os terminais de usuário são conectados às suas respectivas estações base e a perda de acoplamento entre as estações simuladas é calculada. Por fim, escalonamento e controle de potência são executados, seguidos pelo cálculo e armazenamento dos resultados. Todo o processo de simulação é descrito em detalhes a seguir.

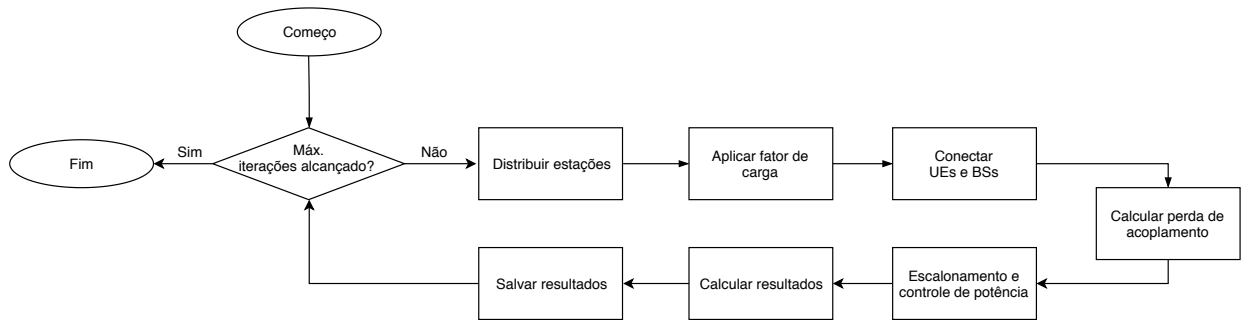


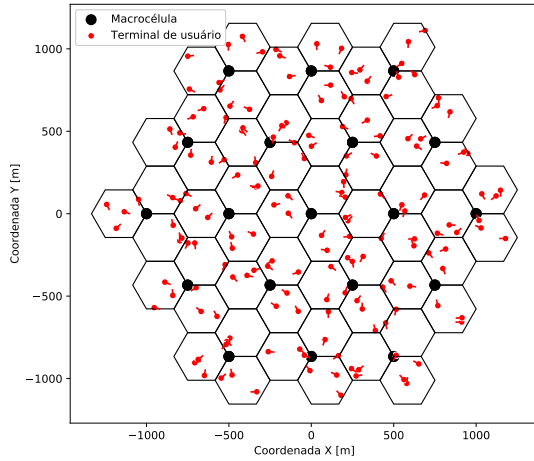
Figura 3.1: Diagrama de blocos do simulador.

3.2.1.1 Distribuição das estações

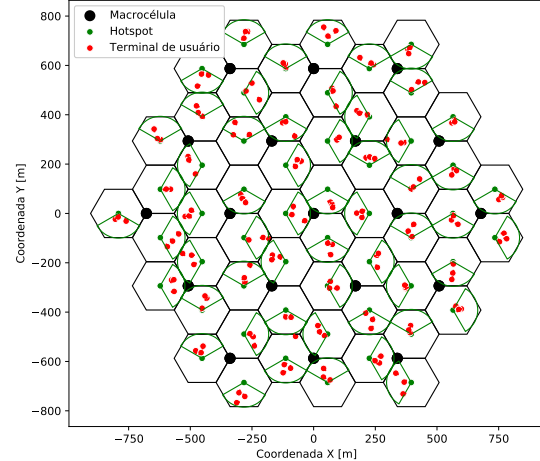
Durante cada iteração de simulação, estações base e terminais de usuário são posicionados aleatoriamente de acordo com uma das topologias ilustradas na Figura 3.2, sendo elas topologias especificadas pela UIT em [27] com a intenção de se padronizar os estudos realizados por fontes diversas e facilitar a comparação entre eles. Essas topologias são uma distribuição macrocelular (Figura 3.2(a)), de *hotspots* (Figura 3.2(b)) e *indoor* (Figura 3.2(c)), nas quais há sempre a mesma quantidade de terminais de usuário ativos por estação base. Considera-se que terminais de usuário sempre se conectam à estação base mais próxima, o que é uma simplificação razoável uma vez que, em ondas milimétricas, a potência do sinal vindo de uma célula adjacente vai provavelmente ser muito menor do que a do sinal proveniente da estação base da célula mais próxima. Detalhes como a distribuição de usuários e o apontamento de antenas em cada tipo de topologia são discutidos a seguir.

Na topologia macrocelular, mostrada na Figura 3.2(a), cada sítio serve três células distintas, nas quais um número fixo de terminais de usuário é distribuído uniformemente. As antenas desses terminais de usuário apontam na direção das suas respectivas estações base com um desvio entre $\pm 60^\circ$ na direção de azimute e entre $\pm 90^\circ$ na direção de elevação. Em cada setor, as estações base têm uma elevação de -10° com relação ao plano horizontal e altura de 25 m. Os terminais de usuário têm altura de 1,5 m, e, tanto na topologia macrocelular quanto na topologia *hotspot*, a distância entre estações é calculada por meio de um algoritmo de *wrap around*, descrito no Anexo II.

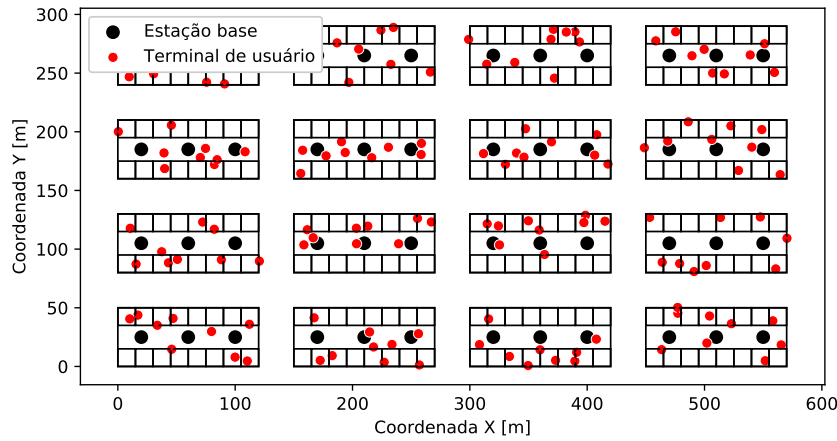
As macrocélulas servem de moldura para o posicionamento dos *hotspots* na topologia da Figura 3.2(b). Como ondas milimétricas estão mais sujeitas a perdas, as estações base da macrocélula e quaisquer terminais de usuário que estejam sendo servidos por essas estações base operam em frequências sub-6GHz e não são consideradas na análise de compartilhamento dessa topologia. As estações base dos *hotspots* têm uma elevação de -10° com relação à horizontal e um azimute de 0,



(a) Topologia Macrocelular



(b) Topologia *Hotspot*



(c) Topologia *Indoor*

Figura 3.2: Topologias geradas pelo simulador.

90, 180 ou 270°, escolhido aleatoriamente. O apontamento das antenas dos terminais de usuário nessa topologia é semelhante ao da topologia macrocelular.

Dentro da área de cobertura de cada *hotspot* é distribuída a mesma quantidade de terminais de usuário. A distância entre os terminais de usuário e as estações base, nos *hotspots*, segue uma distribuição de Rayleigh com fator de escala $\sigma_d = 32m$, enquanto o azimute dos terminais de usuário na direção das suas respectivas estações base é modelado por uma distribuição normal de média zero e desvio padrão $\sigma = 30^\circ$ truncada em $\pm 60^\circ$. A elevação dos terminais de usuário, por sua vez, é uniformemente distribuída no intervalo de $\pm 90^\circ$, como descrito em [83]. A altura das estações base é de 6 m e dos terminais de usuário de 1,5 m.

Na topologia *indoor*, da Figura 3.2(c), terminais de usuário são distribuídos uniformemente em andares de prédios. Cada terminal de usuário tem uma chance de 5% de ser posicionado do lado de fora do prédio, bem próxima à parede externa, de forma a simular estações que, mesmo do lado

de fora, se conectam a estações base do lado de dentro. A quantidade de estações base por andar pode variar de acordo com a faixa de frequência analisada, mas sempre são distribuídos terminais de usuário de forma que todas as estações base sirvam a mesma quantidade de usuários no instante de tempo de uma iteração. As estações base da topologia *indoor* encontram-se montadas no teto, a 3 m de altura e com o painel de antenas apontando para o chão, e o apontamento das antenas dos terminais de usuário é igual ao das da topologia macrocelular. Também considera-se que os terminais de usuário estão a 1,5 m de altura nessa topologia. Além disso, como especificado em [84], são consideradas estações IMT somente no primeiro andar dos prédios.

3.2.2 Carga na rede

Como o simulador utilizado é estático, deve-se desativar algumas das estações IMT para se simular o agendamento de transmissões no tempo. Por isso, é aplicado um fator de carga, que define a porcentagem de enlaces ativos no instante de tempo da iteração. Sendo assim, enquanto no *half duplex* os enlaces operam todos na mesma direção em uma iteração, no *full duplex* os enlaces ativos podem ser na direção de descida ou de subida. Mais do que isso, quando a rede opera em *half duplex*, considera-se que o esquema de duplexação seja no tempo, ou seja, que a rede opera na direção de descida ou de subida em instantes de tempo diferentes, porém na mesma banda.

Supõe-se, ainda, que pode haver um desequilíbrio entre a carga que a rede envia nos enlaces de descida e subida, de forma que, quando operando em *half duplex*, as estações base passarão mais tempo transmitindo (no enlace de descida) do que os terminais de usuário (no enlace de subida). A Figura 3.3(a) ilustra esse cenário. Nela, o fator de carga define a quantidade de enlaces simultâneos em cada direção, mostrado no eixo das ordenadas. Considera-se ainda um fator de duplexação no tempo, que define a quantidade de tempo em que a rede opera em cada direção, mostrada no eixo das abscissas da Figura. A rede IMT-2020 pode alocar intervalos de tempo para descida e subida das mais diversas maneiras, respeitando a granularidade de blocos de recurso mostrada na Figura 2.1. Sendo assim, a Figura 3.3 somente mostra a proporção de tempo que a rede destina a cada direção, e não necessariamente os intervalos de tempo alocados a cada uma.

No *full duplex* isso se traduz em uma quantidade maior de estações base transmitindo do que terminais de usuário. Como mostra a Figura 3.3(b), um mesmo fator de carga no *full duplex* significa duas vezes mais enlaces do que no *half duplex*, mas com mais estações base transmitindo na direção de descida do que recebendo dados na de subida. Devido a esse desequilíbrio de carga entre as duas direções, terminais de usuário são sempre alocados para transmitir informação utilizando alguma faixa de frequência que já esteja sendo alocada a uma transmissão de descida. No *full duplex* bidirecional, essa faixa é a mesma na qual o terminal de usuário em questão está recebendo dados. Com isso, o *full duplex* é explorado ao máximo e utiliza recursos de rádio da forma mais eficiente.

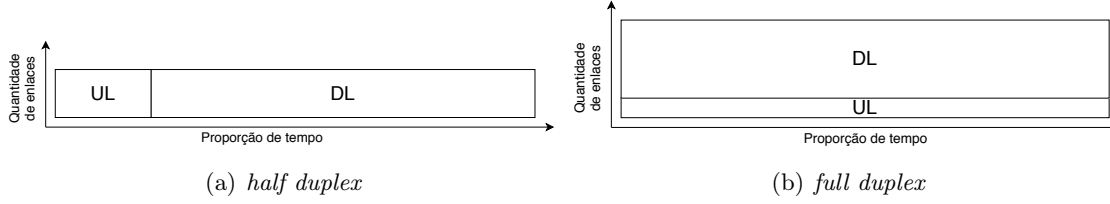


Figura 3.3: Quantidade de enlaces versus proporção de tempo em a) *half duplex* e b) *full duplex*.

3.2.2.1 Cálculo da perda de acoplamento

A perda de acoplamento entre duas estações é a razão entre a potência do sinal transmitido por uma estação e a potência do sinal recebido por outra estação, podendo as estações pertencerem ou não ao mesmo sistema. Dessa forma, a perda de acoplamento inclui não só perdas de propagação, mas também pode englobar perdas ôhmicas nas antenas de transmissão e recepção, perdas nos cabos de alimentação, perdas por absorção do corpo dos usuários, perdas de polarização e outras. Neste trabalho, a perda de acoplamento (CL , do inglês *coupling loss*) em dB é definida como [27]:

$$CL = PL - G_{tx} - G_{rx} + L_{ohm,tx} + L_{ohm,rx} + L_{pol} + L_{body}. \quad (3.1)$$

Na equação, PL (do inglês *Path Loss*) representa a perda de propagação entre as estações, G_{tx} e G_{rx} são os ganhos das antenas de transmissão e recepção, respectivamente; $L_{ohm,tx}$ e $L_{ohm,rx}$ são perdas ôhmicas tanto nas antenas como nos cabos de alimentação das antenas do transmissor e do receptor, respectivamente; L_{pol} é uma perda de polarização; e L_{body} constitui uma perda por absorção do corpo do usuário. A perda de polarização é fixa e igual a 3 dB para perda entre o sistema IMT e o serviço de satélite fixo e igual a 0 dB para a perda entre estações base e terminais de usuário e entre o IMT e o serviço de radioastronomia. Já a perda por absorção do corpo do usuário somente é considerada quando uma das estações é um terminal de usuário. Em outros casos ela é, também, igual a zero.

3.2.2.2 Conformação de feixe e diagramas de radiação

A estações base podem operar tanto com um painel de antenas, que permite a utilização de conformação de feixes, quanto com antenas setorizadas e omnidirecionais, enquanto os terminais de usuário podem operar com antenas omnidirecionais e, também, com painel de antenas. A conformação de feixes utilizada é descrita na referência [27], na qual o ganho de um elemento de antena, em dB, é dado por:

$$A_E(\varphi, \theta) = G_{E,max} - \min(-[A_{E,H}(\varphi) + A_{E,V}(\theta)], A_m). \quad (3.2)$$

Na equação, φ e θ representam a direção de azimute e elevação no sistema de coordenadas do painel de antenas, como representados na Figura 3.4. Além disso, $G_{E,max}$ é o ganho máximo do elemento de antena, $A_{E,V}$ e $A_{E,H}$ são os ganhos vertical e horizontal e A_m é a relação frente-costa horizontal do elemento.

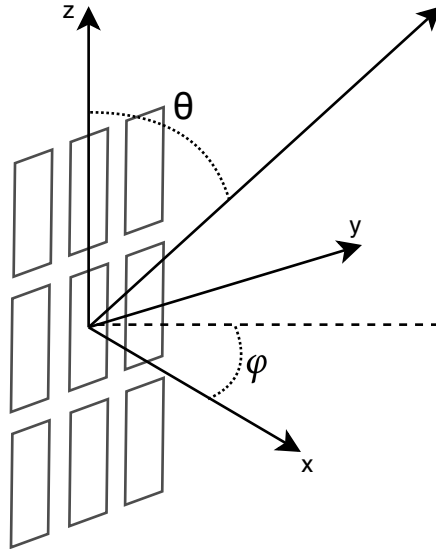


Figura 3.4: Sistema de coordenadas do painel de antenas.

O ganho horizontal, em dB, é dado por:

$$A_{E,H}(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right], \quad (3.3)$$

na qual φ_{3dB} é o ângulo de abertura horizontal de 3 dB do feixe. Já o ganho vertical, em dB, é igual a:

$$A_{E,V}(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta - 90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_v \right], \quad (3.4)$$

sendo θ_{3dB} a abertura vertical de 3 dB e SLA_v a atenuação vertical dos lóbulos laterais do elemento de antena. A Figura 3.5 apresenta os diagramas de radiação horizontal e vertical resultantes da equação 3.2.

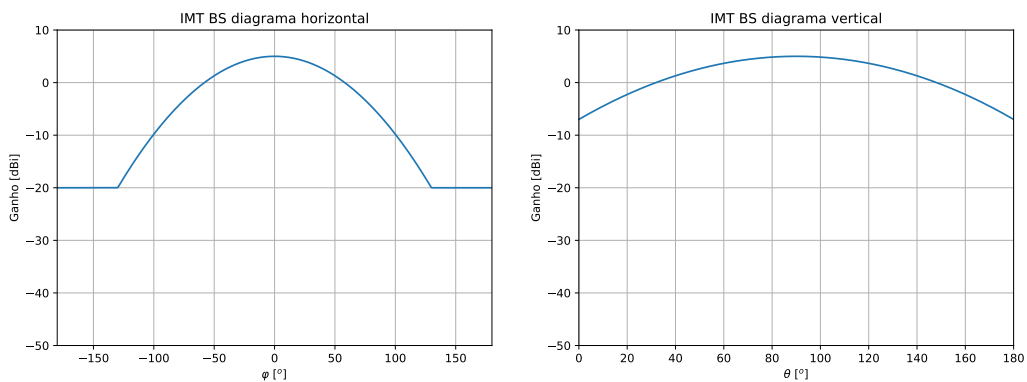


Figura 3.5: Diagrama de radiação horizontal e vertical de um elemento de antena.

Dessa forma, o ganho do i -ésimo feixe criado pelo painel de antenas pode ser computado como:

$$A_{A,i}(\varphi, \theta) = A_E(\varphi, \theta) + 10 \log_{10} \left(\left| \sum_{m=1}^{N_H} \sum_{n=1}^{N_V} w_{i,n,m} \cdot v_{n,m} \right| \right). \quad (3.5)$$

Nessa equação, N_H e N_V representam o número de linhas e colunas da matriz de antenas do painel, enquanto $w_{i,n,m}$ é chamado vetor de pesos e $v_{n,m}$ é o vetor de superposição. Tais vetores são calculados por:

$$w_{i,n,m} = \frac{1}{\sqrt{N_H N_V}} \exp \left(j2\pi \left((n-1) \frac{d_v}{\lambda} \text{sen}(\theta_{i,\text{feixe}}) - (m-1) \frac{d_h}{\lambda} \cos(\theta_{i,\text{feixe}}) \text{sen}(\varphi_{i,\text{feixe}}) \right) \right) \quad (3.6)$$

e por:

$$v_{n,m} = \exp \left(j2\pi \left((n-1) \frac{d_v}{\lambda} \cos(\theta) - (m-1) \frac{d_h}{\lambda} \text{sen}(\theta) \text{sen}(\varphi) \right) \right), \quad (3.7)$$

na qual j é a unidade imaginária ($j = \sqrt{-1}$), d_v é o espaçamento vertical entre os elementos de antena, d_h o espaçamento horizontal entre os elementos e λ é o comprimento de onda da transmissão. As variáveis $\theta_{i,\text{feixe}}$ e $\varphi_{i,\text{feixe}}$ correspondem à direção de apontamento do i -ésimo feixe e têm impacto direto no diagrama de radiação do feixe.

A Figura 3.6 mostra os diagramas de radiação horizontal e vertical para $\varphi_{i,\text{feixe}} = 0^\circ$ e $\varphi_{i,\text{feixe}} = 30^\circ$, além de $\theta_{i,\text{feixe}} = 90^\circ$, ou seja, para a direção de maior ganho no plano xy do feixe formando um ângulo de 0 e 30° com relação ao eixo x da Figura 3.4. Os parâmetros do painel de antenas utilizado são mostrados na Tabela V.1. No diagrama horizontal, percebe-se que, com uma variação do valor de $\varphi_{i,\text{feixe}}$ de 0 para 30° , o lóbulo principal do diagrama se desloca para a direita, representando a mudança do apontamento do feixe. Já no diagrama vertical, embora os valores de ganho mudem com a mudança no apontamento do feixe, a posição do lóbulo principal continua a mesma.

Quando utilizando um painel de antenas, todas as estações IMT têm um feixe apontado na direção de cada estação a qual estão conectadas. No entanto, as estações base podem também empregar antenas setorizadas seguindo o modelo descrito em [85], cujo diagrama de radiação é mostrado na Figura 3.7. Além disso, estações base e terminais de usuário podem empregar antenas isotrópicas, com ganho constante em todas as direções, como aproximação de antenas omnidirecionais, em vez do painel de antenas.

Todos os diagramas de radiação utilizados pelas estações do sistema IMT passam por um processo de normalização. Isso se dá devido ao fato de que o ganho total integrado dos modelos de radiação pode ser diferente de zero. Um ganho total integrado diferente de zero significa que o painel de antenas está perdendo ou gerando potência ao irradiar ou receber o sinal transmitido. Como perdas no painel já são consideradas no cálculo da perda de acoplamento, o ideal é que o ganho total integrado seja zero para que, descartadas as perdas ôhmicas consideradas separadamente, o painel irradie ou absorva a mesma quantidade de potência que lhe foi entregue. Esse processo é descrito no Anexo IV. Além disso, os diagramas mostrados nas Figuras 3.6 e 3.7 estão normalizados.

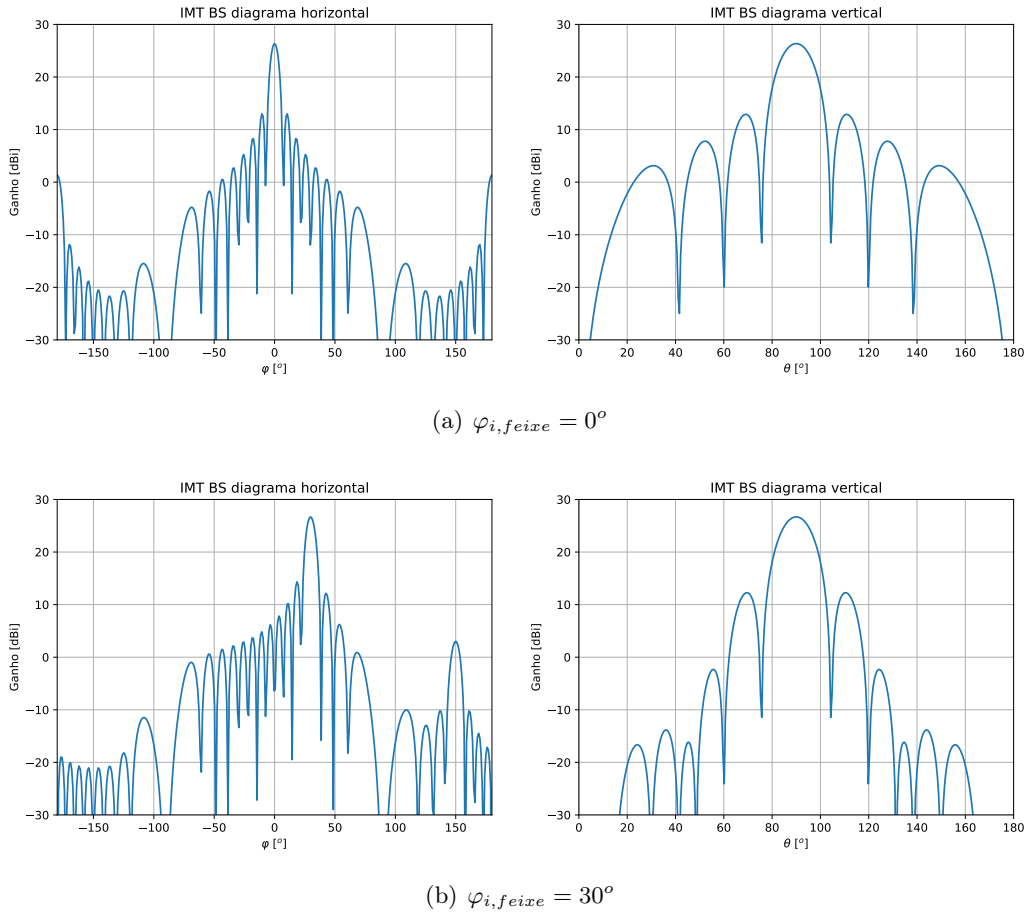


Figura 3.6: Diagramas de radiação horizontal e vertical para (a) $\varphi_{i,feixe} = 0^\circ$ e (b) $\varphi_{i,feixe} = 30^\circ$.

3.2.2.3 Modelos de propagação

Cada uma das topologias apresentadas na Seção 3.2.1.1 tem modelos de propagação específicos para a propagação na rede IMT. São considerados modelos para a propagação entre estações base e terminais de usuário, entre estações base e entre terminais de usuário. Características como posição das estações, distância média entre elas e presença de obstruções e perdas atmosféricas são consideradas, de forma a serem utilizados modelos adequados a cada cenário. Nessa seção os modelos de propagação são descritos.

Para a propagação entre estações base e terminais de usuário, na topologia macrocelular, é utilizado o modelo *Urban Macro* (Macro-Urbano, abreviado para UMa), descrito em [86] e ilustrado na Figura 3.8. Esse modelo descreve dois tipos de perda: com linha de visada (LOS, do inglês *line of sight*) e sem linha de visada (NLOS, *no line of sight*), sendo que o modelo sem linha de visada representa o cenário no qual existem obstruções entre o transmissor e o receptor. A probabilidade das estações estarem ou não em linha de visada também é definida pelo modelo e depende da distância entre as estações e da altura do terminal de usuário. A Figura 3.8(b) mostra a probabilidade de linha de visada para três alturas do terminal de usuário h_u .

A propagação entre estações base de sítios diferentes é descrita pela recomendação ITU-R P.452

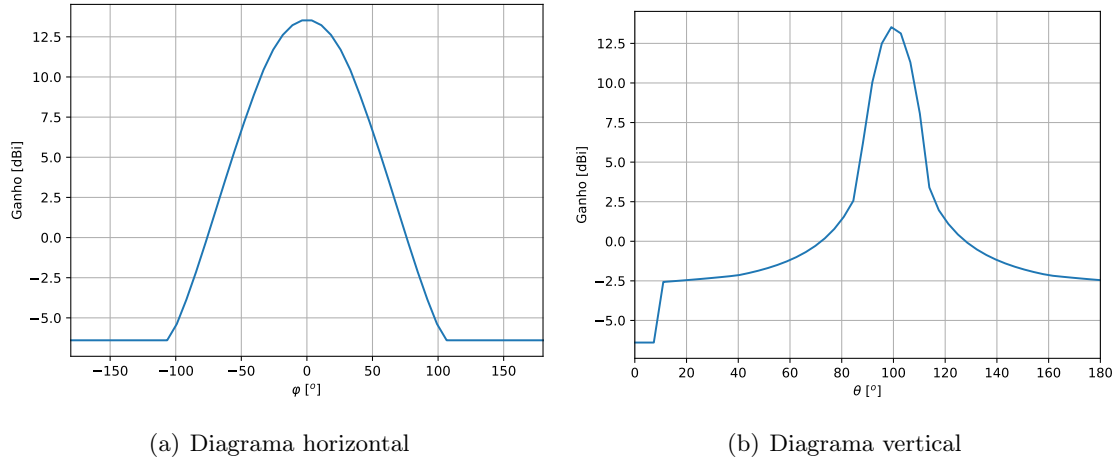


Figura 3.7: Diagramas de radiação a) horizontal e b) vertical da antena setorizada.

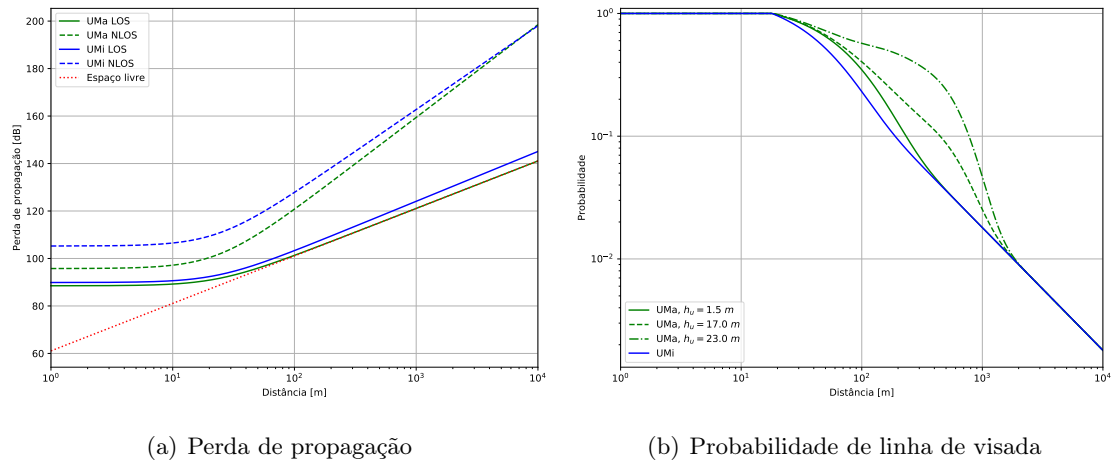
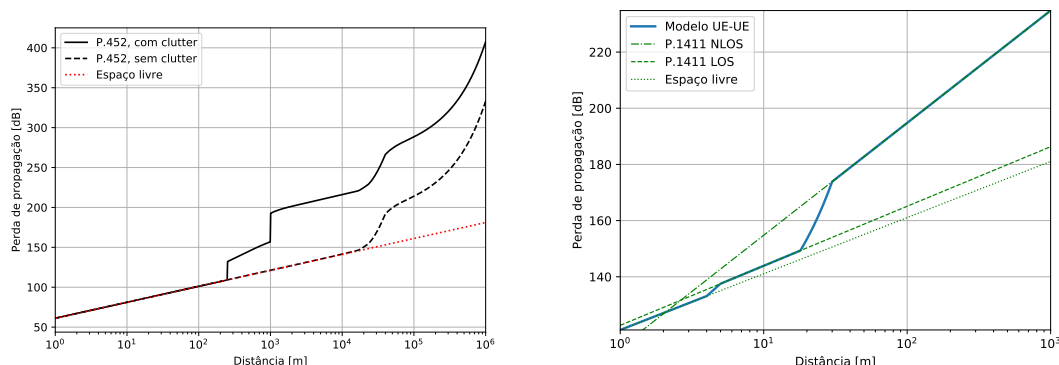


Figura 3.8: a) Perda de propagação e b) probabilidade de linha de visada dos modelos UMi *Street Canyon* e UMA.

[1]. Para distâncias abaixo de 250 m, o modelo se aproxima da propagação no espaço livre. Acima de 250 m consideram-se perdas por obstruções (*clutter*) no lado da estação interferidora (IMT), e a partir de 1000 m consideram-se perdas por obstruções nos dois lados (estação interferidora e interferida). A perda por obstruções é modelada como uma variável aleatória de acordo com [87], sendo o valor apresentado na Figura 3.9(a) a mediana dessa variável. Além disso, o modelo também considera perda por difração, espalhamento troposférico, canalização de sinal, refração atmosférica e espalhamento pluviométrico. Entre antenas que compartilham um sítio, considera-se uma perda fixa, inserida como parâmetro de simulação.

O modelo que descreve a perda entre terminais de usuário pode ser encontrado em [88]. Nele, considera-se a perda entre estações que se encontram abaixo do nível dos prédios em um ambiente urbano. A modelagem aqui utilizada é semelhante à aplicada em [89], na qual a inclinação da curva de perda de propagação depende da distância entre as estações. Para distâncias abaixo de 4 m, utiliza-se perda de propagação no espaço livre, de 5 a 18 m é empregada a perda por linha de visada descrita em [88] Seção 4.1.1, e a partir de 30 m utiliza-se a perda sem linha de visada do

mesmo modelo. Nas transições entre as seções da curva são feitas interpolações, como mostrado na Figura 3.9(b). O modelo também inclui perdas por sombreamento modeladas por uma distribuição log-normal, não incluídas na figura.



(a) Perda de propagação entre estações base (b) Perda de propagação entre terminais de usuário

Figura 3.9: Perda de propagação entre a) estações base e b) terminais de usuário na topologia macrocelular.

Na topologia *hotspot*, para se calcular a perda de propagação entre estações base e terminais de usuário é utilizado o modelo *Urban Micro Street Canyon* (Cânion de Avenidas Micro-Urbano, abreviado como UMi), descrito em [86]. A Figura 3.8 ilustra também esse modelo, no qual, diferente do modelo *Urban Macro*, a probabilidade de linha de visada não depende da altura do terminal de usuário. Para a perda de propagação entre estações base, são utilizadas as curvas de linha de visada (P.1411 LOS) e sem linha de visada (P.1411 NLOS) da Figura 3.9(b), com probabilidade de linha de visada igual à probabilidade de linha de visada entre estações base e terminais de usuário (curva do modelo UMi na Figura 3.8(b)). Essa é, também, uma modelagem semelhante à que é empregada na literatura [89], e é razoável, uma vez que a diferença de altura entre estações base e terminais de usuário na topologia *hotspot* é pequena. O modelo de propagação entre terminais de usuário na topologia *hotspot* é o mesmo da macrocelular.

Para o cenário *indoor* é empregado o modelo de *hotspots indoor* em escritório (*Indoor Hotspot Office*, em inglês, abreviado para *InH Office*) [86]. A Figura 3.10 ilustra o modelo. Quando uma das estações em questão encontra-se fora do prédio, é aplicada uma perda por penetração nas paredes [90]. Esse mesmo modelo de propagação é utilizado para cálculo da interferência entre estações base e entre terminais de usuário, uma vez que estações base não têm uma vantagem de altura tão grande no cenário de *hotspots indoor* e esse é um modelo conservador para a interferência entre terminais de usuário. Como estações base encontram-se no corredor do prédio, como pode ser visto na Figura 3.2(c), considera-se que elas estão sempre em condição de linha de visada entre si. Além disso, a interferência entre estações de prédio diferentes não é considerada, com a justificativa de que essa interferência é irrisória quando comparada à interferência entre estações do mesmo prédio.

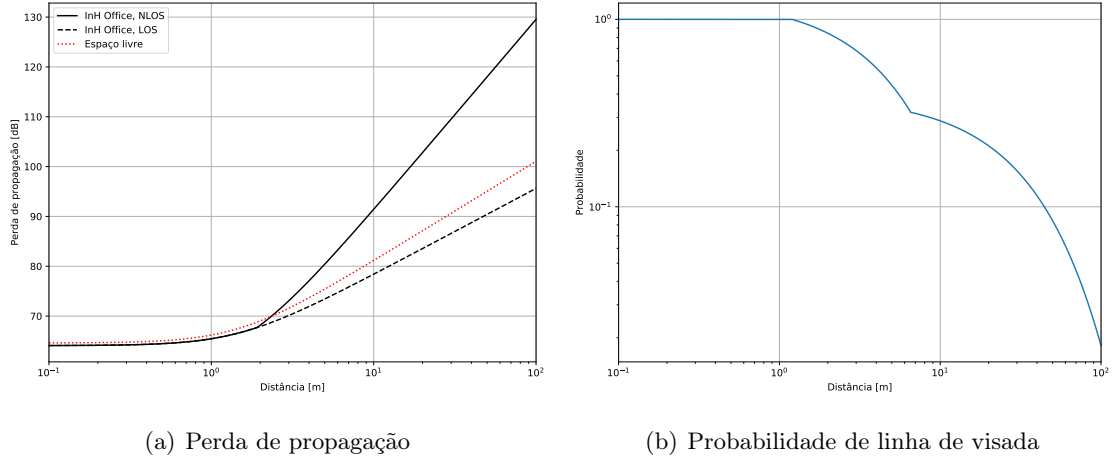


Figura 3.10: a)Perda de propagação e b) probabilidade de linha de visada em cenário *indoor*.

3.2.2.4 Escalonamento e controle de potência

Como descrito na Seção 3.2.1.1, no instante de tempo de uma iteração a mesma quantidade de enlaces é agendada por célula. Sendo assim, após a aplicação de uma banda de guarda, a banda resultante disponível para o sistema IMT é dividida igualmente entre os terminais de usuário de cada célula. Em outras palavras, cada UE na mesma célula recebe a mesma quantidade de blocos de recurso. Dessa forma, a quantidade de blocos de recurso por estação base ($N_{rb,BS}$) é dada por:

$$N_{rb,BS} = \left\lfloor \frac{(1 - r_g)B_{IMT}}{B_{rb}} \right\rfloor \quad (3.8)$$

na qual r_g denota a proporção da banda disponível que é utilizada como banda de guarda; B_{IMT} a banda total alocada ao sistema IMT; B_{rb} a banda de cada bloco de recurso; e $\lfloor \cdot \rfloor$ a função piso, que arredonda o argumento para a sua parte inteira. O cálculo da quantidade de blocos de recurso por UE é feito pela equação:

$$N_{rb,UE} = \left\lfloor \frac{N_{rb,BS}}{N_{UE,cell}} \right\rfloor, \quad (3.9)$$

ou seja, é a parte inteira da razão entre o número de blocos de recurso por estação base ($N_{rb,BS}$) e o número de UEs por célula ($N_{UE,cell}$).

O reuso de frequência é igual a 1, o que significa que todas as células utilizam a mesma banda, tanto na direção de descida como na de subida.

Com relação ao controle de potência, as estações base transmitem sempre em potência máxima, enquanto as UEs transmitem com potência dada por [27]:

$$P_{PUSCH} = \min(P_{CMAX}, 10\log_{10}(N_{rb,UE}) + P_{0_PUSCH} + \alpha CL) \quad (3.10)$$

na qual P_{PUSCH} é a potência de transmissão do terminal em dBm; P_{CMAX} é a potência máxima de transmissão; P_{0_PUSCH} é a potência alvo a ser recebida pela estação base por bloco de recurso; e α é um fator de atenuação, representando perdas de implementação e imprecisões na estimação da perda de acoplamento CL .

3.2.2.5 Indicadores de desempenho

No que tange ao sistema IMT, o último passo de uma iteração de simulação é o cálculo dos indicadores de desempenho do sistema. O primeiro desses indicadores é a razão sinal-ruído (SNR, do inglês, *Signal to Noise Ratio*), definida como:

$$SNR = \frac{S}{P_N} = \frac{P_{rx}}{kTB\bar{F}} \quad (3.11)$$

na qual k é a constante de Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} J/K$); T é a temperatura de ruído do receptor; B a banda de transmissão do sinal; e \bar{F} a figura de ruído do receptor. Enquanto $P_N = kTB\bar{F}$ representa a potência do ruído, $S = P_{rx}$ representa a potência do sinal recebido, e pode ser calculada, em dBm, como:

$$P_{rx} = P_{tx} - CL \quad (3.12)$$

na qual P_{tx} é a potência do sinal transmitido e CL é a perda de acoplamento entre as estações, definida pela Equação 3.1.

Como comentado anteriormente, em uma rede sem fio há interferência intercélulas quando estações de células próximas utilizam a mesma frequência. Tal interferência degrada o sinal recebido e reduz a vazão alcançada, logo ela deve ser levada em consideração ao se levantar o desempenho da rede. Assim, define-se a razão sinal-ruído-interferência como:

$$SINR = \frac{P_{rx}}{N + I} \quad (3.13)$$

na qual I é a interferência total das estações que estão operando na mesma banda.

Com a SINR em mãos, pode-se estimar a eficiência espectral de uma transmissão por:

$$\eta = \begin{cases} 0, & \text{for } SINR < SINR_{MIN} \\ \beta S(SINR), & \text{para } SINR_{MIN} \leq SINR < SINR_{MAX} \\ \beta S(SINR_{MAX}), & \text{para } SINR \geq SINR_{MAX} \end{cases} \quad (3.14)$$

na qual $S(\cdot)$ representa a capacidade de Shannon ($S(SINR) = \log_2(1 + SINR)$); β representa um fator de atenuação, que modela a incapacidade do sistema de chegar ao limite de Shannon; $SINR_{MIN}$ e $SINR_{MAX}$ são, respectivamente, os valores de SINR mínimo, abaixo do qual não há comunicação, e máximo, acima do qual a vazão de dados não pode mais aumentar. O valor desses parâmetros é mostrado no Anexo V. Quando multiplicada pela banda de transmissão, a eficiência espectral resulta na vazão de dados alcançada por uma estação. A vazão de dados das estações pode, então, ser somada para se determinar a vazão agregada em uma iteração de simulação. Ademais, quando a rede opera em *half duplex* com duplexação no tempo, os valores de vazão na descida e subida de dados são multiplicados pelo fator de duplexação no tempo associado a cada direção.

3.3 Modelagem do serviço de satélite fixo

Nessa seção serão detalhadas as características de um dos sistemas que sofrem interferência do IMT, o serviço de satélite fixo. Diagramas de radiação, modelos de propagação e indicadores de

desempenho para cada sistema são apresentados e discutidos. As estações do FSS foram separadas em duas subseções, uma para a estação espacial e outra para a estação terrestre.

3.3.1 Estação espacial

Neste trabalho foram simulados somente satélites geostacionários, em órbitas de, aproximadamente, 36000 km de altitude. Dados o diagrama de radiação utilizado e a altitude da órbita, a área de cobertura desses satélites é bem ampla, de forma que eles sofrem interferência de múltiplas redes IMT. Nessa seção será descrito o cálculo da interferência agregada das múltiplas redes IMT no satélite. Além disso, o modelo de propagação e os indicadores de desempenho das estações espaciais do serviço de satélite fixo são apresentados.

3.3.1.1 Diagrama de radiação

O diagrama de radiação utilizado pela estação espacial do serviço de satélite fixo é mostrado na Figura 3.11, na qual L_s é o valor de atenuação dos lóbulos laterais da antena. Esse diagrama representa uma envoltória de radiação, e mostra o ganho relativo ao ganho máximo da antena em função do ângulo com relação ao eixo principal da antena. O diagrama é descrito em detalhes em [91].

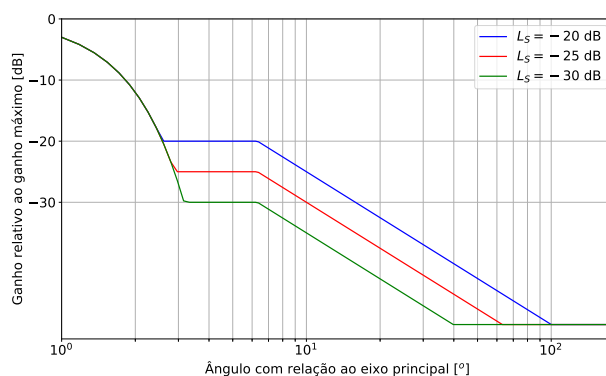


Figura 3.11: Diagrama de radiação da estação espacial.

3.3.1.2 Modelo de propagação

Para o cálculo da perda de propagação entre a rede IMT e o satélite utiliza-se o modelo descrito em [92]. Ele modela perdas entre estações espaciais e terrestres em faixas de frequência de 100 MHz a 100 GHz, considerando perdas por gases atmosféricos, cintilação troposférica e ionosférica, obstrução do percurso, difração em prédios e precipitação. A correlação entre os mecanismos de propagação também é considerada, bem como os perfis de pluviosidade e condições atmosféricas da região específica a ser simulada. Nesse trabalho foram utilizados dados atmosféricos da cidade de São Paulo.

3.3.1.3 Área de cobertura

Define-se como ângulo de elevação (ou somente elevação) de um satélite o ângulo que o eixo principal da antena do satélite faz com o plano horizontal do solo; e como ângulo de abertura, ou ângulo de visibilidade, o ângulo entre os eixos nos quais o ganho assume um determinado valor. Esse valor pode ser um valor de ganho 3 dB abaixo do ganho máximo da antena, por exemplo, ou pode ser um valor tal que a maior parte da potência irradiada pela antena encontra-se dentro da área de cobertura. Como o diagrama da Figura 3.11 define o ganho máximo em cada uma das direções, a eficiência dele ultrapassa 100%. Por isso, neste trabalho é considerado um ângulo de visibilidade de $0,65^\circ$, dentro do qual o diagrama irradia aproximadamente 101% da potência a ele entregue. Ângulos maiores do que isso correspondem a eficiências superiores a 101% e resultam em uma superestimação inverossímil da interferência. A Figura 3.12 ilustra a elevação e ângulo de abertura de uma estação espacial.

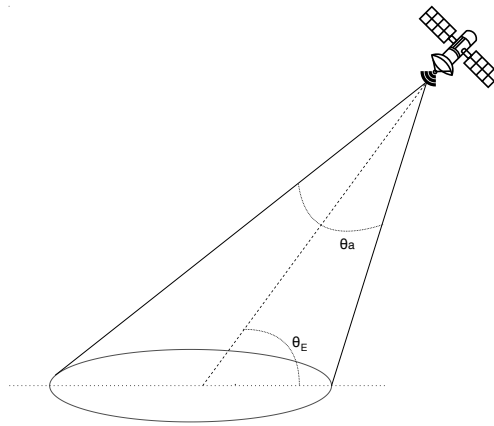


Figura 3.12: Elevação (θ_E) e ângulo de abertura (θ_a) do satélite.

Os valores desses dois ângulos, junto com a altitude da órbita do satélite, definem o tamanho da área de cobertura do satélite e, uma vez que somente estações IMT dentro dessa área de cobertura irão causar interferência no satélite, definem também a quantidade de estações IMT que interferem no satélite. Quanto maior o ângulo de abertura, maior será a área de cobertura, enquanto a relação entre elevação e área de cobertura é inversa: quanto menor a elevação, maior a área. A Figura 3.13 a) ilustra essa relação. Nela, o satélite SAT 1, com maior elevação, cobre uma área menor do que o satélite SAT 2, com menor elevação, mesmo ambos tendo a mesma visibilidade. A Figura 3.13 b) mostra a área de cobertura em função do ângulo de elevação. A área é decrescente com a elevação exceto para valores pequenos de elevação, nos quais a própria curvatura da terra limita a área de cobertura. O método utilizado para se calcular essa área é descrito em [93] e explicado no Anexo III.

3.3.1.4 Indicadores de desempenho

Como mostrado na Figura 3.13 b), a área de cobertura do satélite pode chegar a mais de 800000 km^2 , de forma que simular todas as estações IMT nessa área se torna inviável. Por isso, para

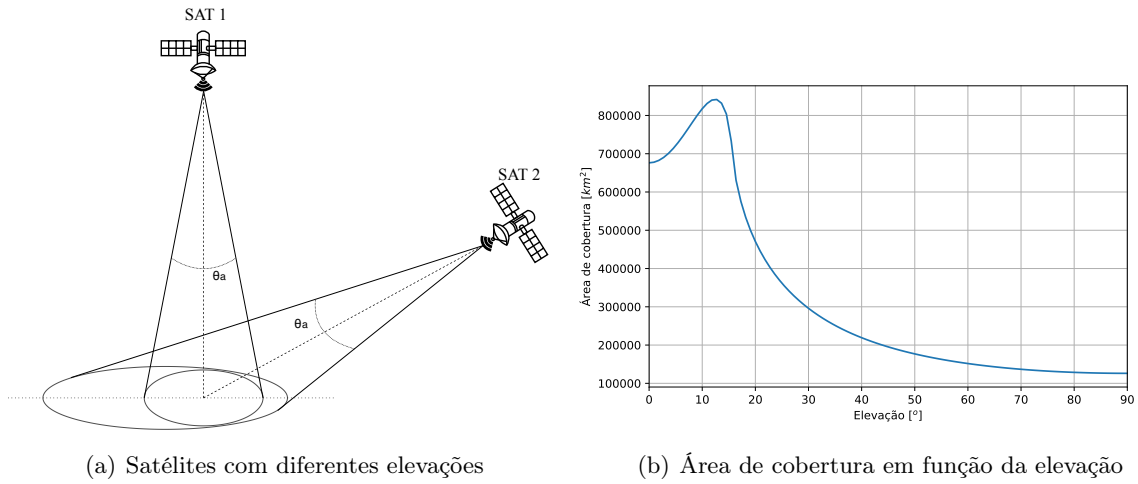


Figura 3.13: Relação entre elevação e área de cobertura.

se estimar a interferência na estação espacial, simula-se uma rede como a mostrada na Figura 3.14, composta de seis conjuntos de macrocélulas, como a da Figura 3.2, em volta de um conjunto central. A distância entre sítios dessa topologia é calibrada de forma que o cenário de simulação ocupe uma área igual à área de cobertura do satélite mas, em cada célula simulada, são posicionadas estações com densidade de distribuição inferior à prevista para o sistema IMT-2020. Com isso, há redução no tempo de simulação mas os resultados passam a requerer um pós-processamento ao fim das simulações, como será explicado mais adiante.

Nesse cenário, na n -ésima iteração de simulação, a interferência agregada recebida pelo satélite ($I_{aggr,n}$), em dBm, é:

$$I_{aggr,n} = \sum_l P_{UE,l} CL_{UE,l} + \sum_k P_{BS,k} CL_{BS,k} \quad (3.15)$$

na qual $P_{UE,l}$ e $P_{BS,j}$ são as potências de transmissão da l -ésima e k -ésima UE e BS ativas e transmitindo dados, respectivamente; e $CL_{UE,l}$ e $CL_{BS,j}$ são as perdas de acoplamento entre essas estações e o satélite, definidas de acordo com a Equação 3.1. Com essa interferência agregada em mãos, a interferência total de todas as estações na área de cobertura (não só as simuladas), é dada por:

$$I_{aggr} = \sum_{n=0}^S I_{aggr,n} \quad (3.16)$$

sendo I_{aggr} a interferência agregada total e S o fator de segmento. A Equação 3.16 está em escala linear, e não em dB.

O fator de segmento é a razão entre o número de estações que se espera ter na área de cobertura e o número de estações que de fato foi simulado. Assim, a equação que permite o cálculo de S é:

$$S = \frac{N_s}{N_{sim}} = \frac{A_s \cdot D_l}{N_{sim}} \quad (3.17)$$

na qual N_s é o número total de estações, que é igual a área de cobertura (A_s) vezes a densidade de estações (D_l); N_{sim} é o número de estações simuladas em uma iteração.

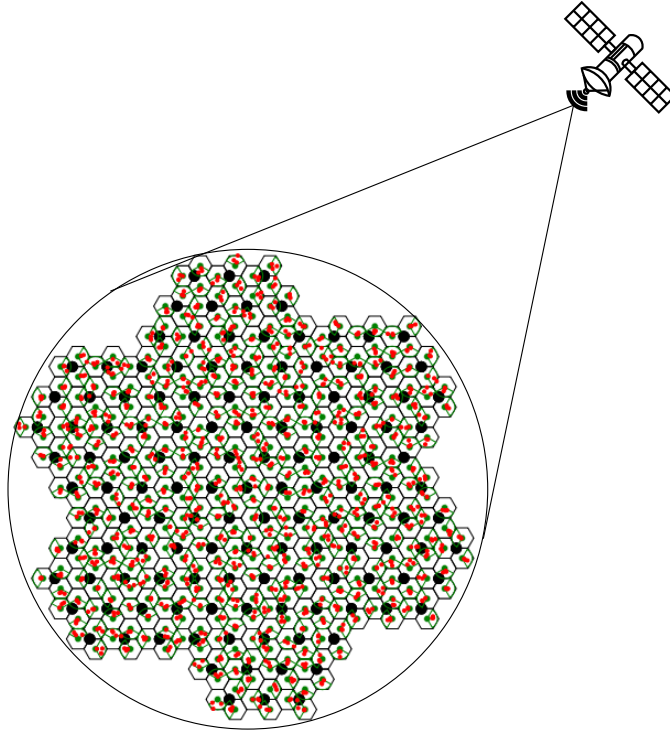


Figura 3.14: Rede de simulação para estudos de convivência com estação espacial.

A densidade D_l é uma combinação entre a densidade de estações em áreas urbanas $D_{l,urb}$ e suburbanas $D_{l,sub}$. Essas densidades são calculadas pelo produto entre a densidade de *hotspots* no ambiente em questão (urbano ou suburbano) $D_{s,amb}$, a razão entre a área de *hotspots* e a área do ambiente $R_{a,amb}$ e a razão entre a área do ambiente e a área total estudada $R_{b,amb}$, ou seja: $D_{l,amb} = D_{s,amb} \cdot R_{a,amb} \cdot R_{b,amb}$, sendo o subscrito *amb* referente ao ambiente urbano (*urb*) ou suburbano (*sub*). A densidade de estações na área é calculada como: $D_l = D_{l,urb} + D_{l,sub}$.

Em geral, ao se calcular a interferência agregada total I_{aggr} na equação 3.16, utiliza-se um conjunto aleatório de \mathcal{S} amostras de interferência agregada por iteração $I_{aggr,n}$. Essas amostras são resultado de iterações de simulações, descritas pela Equação 3.15. Mais do que isso, para simulações em que o IMT opera em *half duplex*, essas \mathcal{S} amostras são escolhidas entre resultados de simulação da direção de descida e de subida na mesma proporção do tempo em que a rede IMT opera em cada uma das direções. Para o *full duplex* o conjunto de amostras é escolhido da mesma distribuição de resultados, já que nesse caso as direções de enlace são simulados simultaneamente respeitando o desequilíbrio de carga do sistema IMT.

Com isso, é possível variar os elementos desse conjunto, escolhendo-se aleatoriamente \mathcal{S} amostras de $I_{aggr,n}$ para compor cada amostra de I_{aggr} , e criar um espaço de amostras de interferência agregada total I_{aggr} . Esse espaço de amostras pode ser apresentado na forma de uma função de distribuição cumulativa da razão interferência-ruído, ou INR (do inglês, *interference to noise ratio*). A razão interferência-ruído é definida como:

$$INR = \frac{I_{aggr}}{P_{N,sat}} \quad (3.18)$$

na qual $P_{N,sat}$ é o nível de ruído da estação satelital.

Para se determinar se o sistema IMT causa interferência danosa na estação espacial, confronta-se a razão interferência-ruído obtida via simulação com o critério de proteção do satélite. Se a razão interferência-ruído estiver abaixo do critério de proteção, os dois sistemas podem compartilhar a mesma faixa de frequência. Caso contrário, algum tipo de coordenação ou restrição deverá ser colocada em prática para proteger de interferência danosa os sistemas existentes. Os valores específicos para os critérios de proteção são discutidos na Seção 3.5.

3.3.2 Estação terrestre *gateway*

Nessa seção considera-se estações terrestres do tipo *gateway*, ou seja, estações responsáveis pela conexão da rede satelital com outras redes. Elas recebem dados via fibra ótica, enlace de micro-ondas ou outros meios e retransmitem esses dados para a estação espacial, que, por sua vez, transmitem os dados para os usuários finais. Dessa forma, a posição dessas estações terrestres é conhecida, e a coordenação com as redes IMT, de forma a reduzir a interferência, se dá na forma de uma distância de separação mínima entre a estação terrestre e a rede IMT. Esses e outros detalhes da estação terrestre são discutidos nas próximas seções.

3.3.2.1 Diagrama de radiação e modelo de propagação

A Figura 3.15 mostra o diagrama de radiação das antenas utilizadas pela estação terrestre do serviço de satélite fixo com diâmetros (D) de 0,45 e 1,8 m. Mais uma vez, esse diagrama representa uma envoltória do ganho máximo que a antena pode ter em cada uma das direções. Em estudos de convivência, no entanto, em que estamos interessados na interferência máxima que o serviço de satélite fixo pode sofrer, utilizar a envoltória do ganho máximo em vez de um diagrama de radiação real pode ser vantajoso. Os detalhes desse diagrama são apresentados em [94]. Além disso, [1] descreve o modelo de propagação utilizado para se estimar a interferência medida na estação terrestre, o mesmo da Figura 3.9(a).

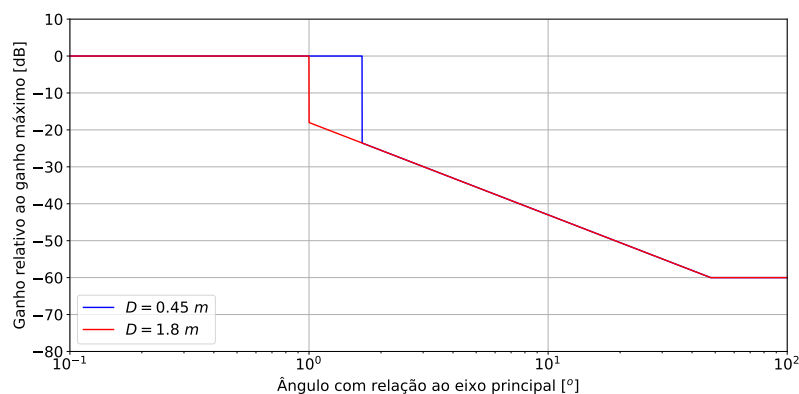


Figura 3.15: Diagrama de radiação da estação terrestre.

3.3.2.2 Indicadores de desempenho

Assim como para a estação espacial, o critério de proteção para a estação terrestre também é definido em termos de razão interferência-ruído. O escalonamento dos resultados de simulação para grandes áreas, no entanto, não é necessário, uma vez que a estação terrestre encontra-se na superfície da Terra e não cobre uma área tão grande. Com isso, a razão interferência-ruído pode ser medida ao final de cada iteração de simulação, e calculada como:

$$INR_n = \frac{I_{aggr,n}}{P_{N,es}} \quad (3.19)$$

na qual INR_n é a medida de razão interferência-ruído na n -ésima iteração e $P_{N,es}$ é o nível de ruído do receptor da estação terrestre. $P_{N,es}$ é calculado de forma semelhante ao cálculo da estação espacial.

Ao simular diversas iterações, pode-se montar uma função de distribuição cumulativa com os valores de INR_n obtidos. Assim, pode-se levantar a porcentagem de casos nos quais a interferência se encontra acima do critério de proteção o que, embora não possa ser avaliado como uma porcentagem do tempo (uma vez que o simulado utilizado é estático e não implementa o conceito de variação temporal) pode ser visto como uma estimativa da probabilidade de interferência entre os sistemas. Mais do que isso, pode-se variar a distância d entre os sistemas para se determinar uma separação mínima que garanta a convivência, como mostrado na Figura 3.16.

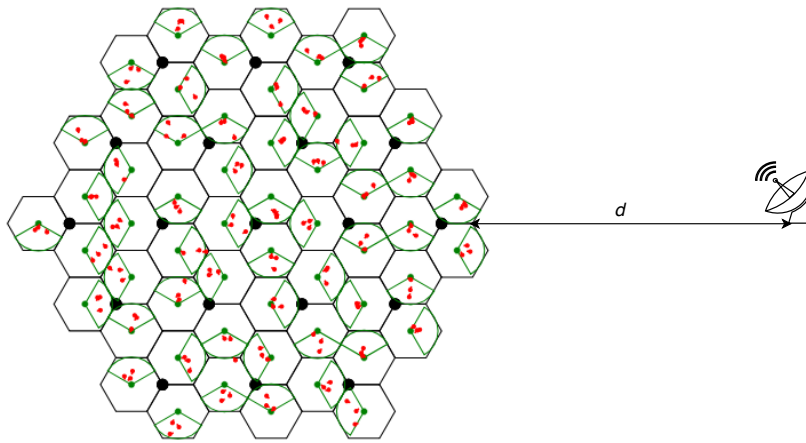


Figura 3.16: Posição da estação terrestre em relação à rede IMT.

3.3.3 Terminal de usuário

Como usuários podem, a princípio, instalar estações do serviço de satélite fixo em qualquer local, a coordenação entre esse tipo de estação e o IMT é particularmente difícil. Sendo assim, existe a possibilidade da estação de usuário do serviço de satélite fixo dividir espaço com o IMT e sofrer alta interferência. Os detalhes da modelagem dessa estação são descritos a seguir.

3.3.3.1 Diagrama de radiação

A Figura 3.17 mostra o diagrama de radiação das antenas dos terminais de usuário do serviço de satélite fixo com diâmetros D de 0,3 e 0,74 m. Esses são, também, diagramas de ganho máximo, e o ganho real das antenas deve estar abaixo dos limites mostrados na Figura. Os detalhes do diagrama são descritos em [95].

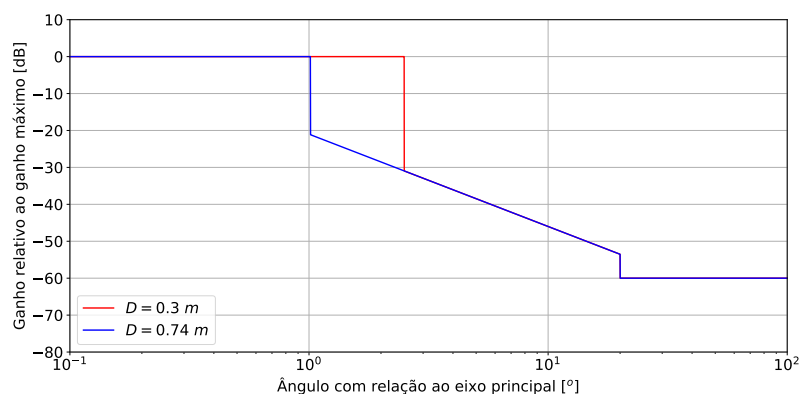


Figura 3.17: Diagrama de radiação do terminal de usuário do serviço de satélite fixo.

3.3.3.2 Modelos de propagação

Para propagação nas topologias macrocelular (Figura 3.2(a)) e *hotspot* (Figura 3.2(b)) utiliza-se o modelo ilustrado na Figura 3.18. Nele, considera-se propagação no espaço livre para distâncias inferiores a 35 m, em linha de visada para distâncias entre 100 e 260 m, e sem linha de visada a partir de 260 m. Nas transições, são utilizadas interpolações entre um tipo de propagação e outro, como mostra a Figura. Perda por difração também é considerada na borda do prédio onde se encontra a estação de usuário do serviço de satélite fixo. Considera-se que a estação do serviço de satélite fixo encontra-se no centro do telhado de prédios de seis andares com dimensões semelhantes aos da Figura 3.2(c). Sendo assim, a difração é descrita pelo modelo de gume de faca simples em [96].

Quando o IMT-2020 opera na topologia *indoor*, no entanto, o modelo descrito acima também considera perda por penetração nas paredes dos prédios. Com as estações base e terminais de usuário dentro de prédios, parte da interferência gerada será absorvida pela estrutura predial, causando uma perda modelada por uma variável aleatória [90], no caso dos terminais de usuário, ou por uma perda fixa de 45 dB, no caso das estações base.

Para o IMT na topologia *indoor*, também foi analisado o caso em que a estação de usuário do serviço de satélite fixo encontra-se na lateral de um prédio. Nesse caso, em que tanto as estações do IMT quanto o terminal do serviço de satélite fixo estão abaixo da linha dos prédios, utilizam-se os modelos de propagação da Figura 3.9(b) e não é considerada perda por difração. Para estações no mesmo prédio do terminal do serviço de satélite fixo é empregada perda no espaço livre, para

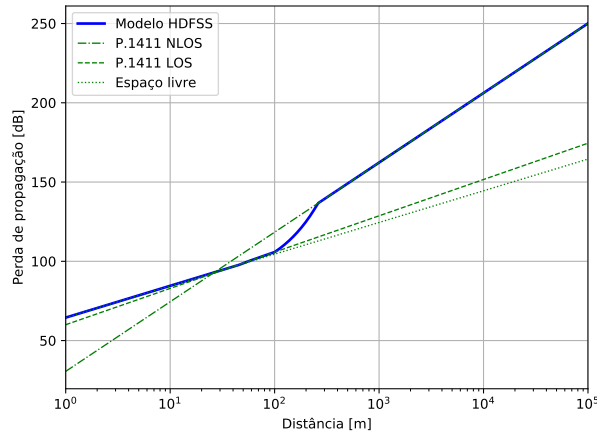


Figura 3.18: Propagação entre o IMT e o terminal de usuário do serviço de satélite fixo.

estações no prédio em frente é empregada perda em linha de visada enquanto perda sem linha de visada é utilizada para os demais prédios. Independente da posição das estações, são considerados 50 dB de perda por andar para estações que compartilham o prédio com o terminal de usuário do serviço de satélite fixo.

A Figura 3.19 mostra as posições consideradas e as perdas associadas a cada uma delas. De forma a se respeitar a densidade de estações IMT previstas pela UIT, em cada iteração de simulação somente uma quantidade fixa de prédios contém estações celulares, como mostra a Figura 3.19(a).

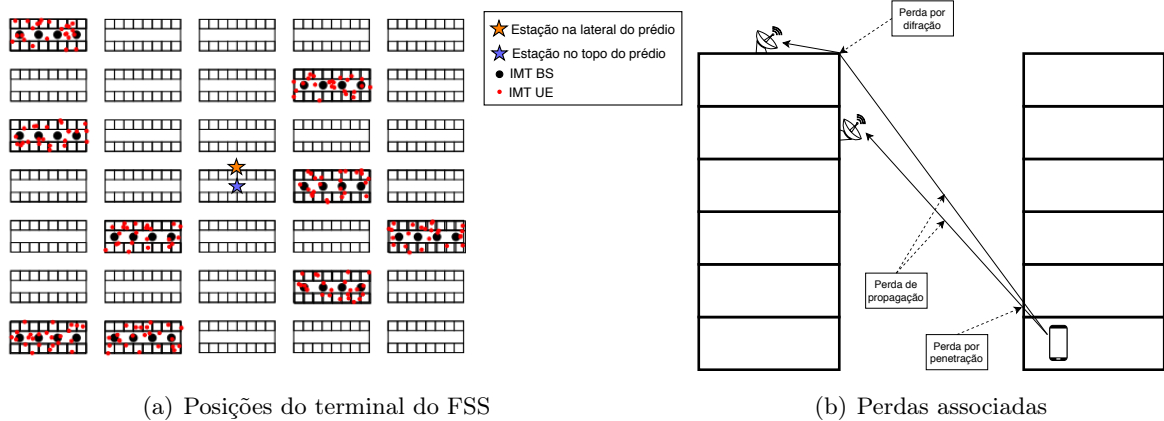


Figura 3.19: a) Posições do terminal de usuário FSS no cenário *indoor* e b) perdas associadas.

3.3.3.3 Indicadores de desempenho

A razão interferência sobre ruído também é a métrica de interferência utilizada para o terminal de usuário do serviço de satélite fixo. Calculada da forma descrita na Seção 3.3.2.2, a garantia de convivência entre os sistemas acontece quando a razão interferência-ruído está abaixo dos critérios de proteção da estação. Devido à impossibilidade de se estabelecer uma distância mínima entre o

IMT e a estação do serviço de satélite fixo, a coordenação se dá por meio do estabelecimento de restrições ao serviço de comunicações móveis, como exigir que opere somente *indoor* ou estabelecer limites de potência de transmissão.

3.4 A radioastronomia

Por se tratar de um serviço passivo, a radioastronomia é particularmente sensível a interferências, requerendo largas zonas de exclusão nas quais nenhum outro sistema pode operar na mesma frequência da radioastronomia. Na Figura 3.20 pode-se ver a modelagem dessa zona de exclusão. Nela, uma área em forma de anel em volta da estação de radioastronomia contém estações IMT. Essa é a área de estudo considerada. O objetivo é, então, encontrar o menor valor de raio dessa zona de exclusão que permite a convivência com o serviço de telefonia móvel. A largura do anel é definida pela largura de uma rede de simulação, como a mostrada na Figura 3.2(b). Assim como no caso da estação espacial do serviço de satélite fixo, simular todas as estações contidas na área de estudo pode ser inviável. Sendo assim, a interferência agregada total também é dada pela Equação 3.16, com fator de segmento calculado pela Equação 3.17. A única diferença entre o pós-processamento realizado para o serviço de radioastronomia e a estação espacial é que, para o primeiro, é considerado somente o ambiente urbano com estações IMT ocupando 100% da área de estudo, ou seja, $R_a = 100\%$ e $R_b = 100\%$.

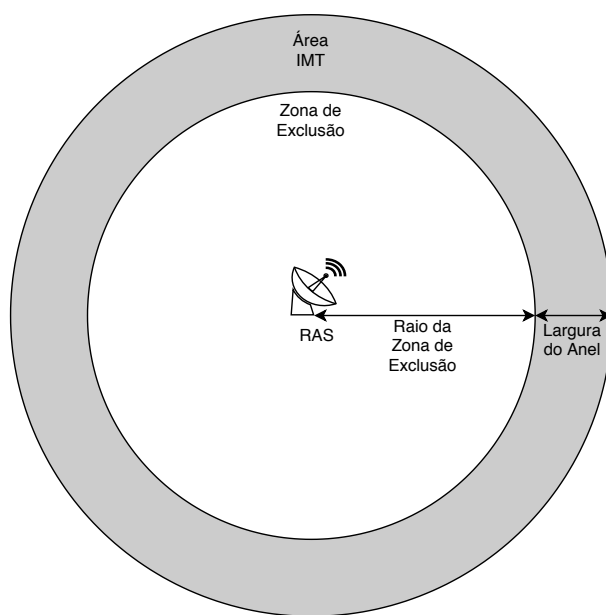


Figura 3.20: Zona de exclusão da radioastronomia.

3.4.1 Diagrama de radiação e modelo de propagação

De acordo com a recomendação ITU-R RA.769 [97], o ganho de 0 dBi pode ser utilizado para se estimar a interferência vinda de estações terrestres como uma aproximação válida do ganho médio

dos lóbulos laterais das antenas de radioastronomia. Sendo assim, para essas estações consideram-se antenas isotrópicas. O modelo de propagação utilizado para a interferência do IMT para a estação de radioastronomia é o mesmo da Figura 3.9(a), descrito em [1].

3.4.2 Indicadores de desempenho

Os critérios de proteção do serviço de radioastronomia são dados em termos de interferência total medida na banda de operação. Como estações desse serviço podem operar com larguras de banda da ordem de gigahertz, as emissões fora da banda principal do sistema IMT também devem ser consideradas. A Figura 3.21 mostra a máscara espectral do sistema IMT, bem como a banda de operação da estação de radioastronomia considerados nesse trabalho. A densidade espectral de potência mostrada na banda principal do serviço IMT foi calculada com base na potência máxima de transmissão das estações. É importante ressaltar que, embora as simulações realizadas considerem as densidades de potência mostradas na figura, os níveis de emissão fora de banda apresentados são os máximos, que são alcançados somente por emissões espúrias de banda estreita. Ainda assim, para se analisar um caso extremo de interferência, consideram-se o valores mostrados na Figura 3.21 em toda a banda de operação da radioastronomia.

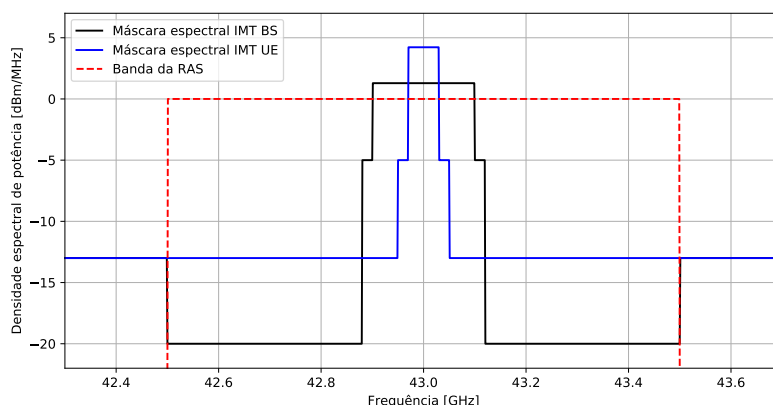


Figura 3.21: Máscara espectral do sistema IMT e banda do RAS.

As máscaras fornecem uma densidade espectral de potência fora da banda principal do sistema IMT. Com isso, é possível calcular a potência fora da banda do IMT que interfere no sistema de radioastronomia e, usando a Equação 3.15 a interferência agregada decorrente dessa potência. Essa interferência é somada à interferência em cocanal compondo, assim, a interferência total em uma iteração de simulação.

3.5 Critérios de proteção

Neste trabalho são usados os critérios de proteção de razão interferência-ruído menor do que -10,5 dB para o serviço de satélite fixo e densidade espectral de potência da interferência menor

do que -191 dBW/GHz para a radioastronomia. A UIT define outros critérios para esses sistemas, mas aqui serão utilizados os de menor valor, já que, garantida a convivência para esses critérios, também será possível a convivência em limitações menos restritivas de interferência. Vale ressaltar que limites temporais também foram estabelecidos para cada critério de proteção, de forma que o valor de $-10,5$ dB de razão interferência-ruído no serviço de satélite fixo não deve ser ultrapassado por mais de 20% do tempo, por exemplo. Inúmeros debates sobre a possibilidade da associação dos resultados de um simulador estático, como o SHARC, a tais limites temporais foram realizados em reuniões regulatórias nos últimos anos. Para evitar que sejam feitas considerações inadequadas quanto à interpretação dos resultados, neste trabalho considera-se que a convivência é possível caso a interferência medida em todas as iterações esteja abaixo dos critérios de proteção. Caso contrário, há situações em que o compartilhamento de frequência não é possível e estudos mais aprofundados ou medidas de coordenação devem ser realizadas.

Capítulo 4

Resultados e análise do *full duplex*

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulação do IMT-2020 operando em *half duplex* e *full duplex*. Os resultados dos dois tipos de duplexação são comparados, de forma a se levantar o ganho de vazão de dados do *full duplex* em diversos cenários. São variados a topologia e tipo de antena empregada, o cancelamento de autointerferência e o desequilíbrio de carga entre as direções de descida e subida para se definir os cenários mais favoráveis ao uso do *full duplex*. Mais do que isso, as configurações nas quais o *full duplex* é mais provável de ser utilizado são apresentadas e comparadas com os casos ideais. Dessa forma, será possível levantar como se dará a convivência do IMT-2020 operando em *full duplex* com outros serviços existentes. Esse levantamento é feito no capítulo seguinte. Os parâmetros de todas as simulações apresentadas aqui são baseados em recomendações da UIT [84] e encontram-se no Anexo V. Nos resultados apresentados neste capítulo o sistema IMT-2020 opera na faixa de 27-27,5 GHz.

4.2 Comparação entre topologias

O primeiro conjunto de resultados apresentado constitui uma comparação entre as topologias descritas no Capítulo 3. Cada uma das três topologias tem suas particularidades de propagação e distribuição de estações, de forma que o perfil de interferência em cada um desses cenários será único e particular. Além disso, foram empregadas antenas com e sem conformação de feixes para todos os casos simulados, sendo a conformação de feixes empregada com painéis de 8x8 e 4x4 antenas para as estações base e terminais de usuário, respectivamente. As antenas sem conformação de feixe utilizadas para os terminais de usuário são isotrópicas, enquanto para as estações base são utilizadas antenas setorizadas, nas topologias macrocelular e *hotspot*, ou isotrópicas, na topologia *indoor*. Todas as topologias apresentam aproximadamente o mesmo número de enlaces simulados.

As simulações apresentadas nesta seção se aproximam do caso ideal de aplicação do *full duplex*, com cancelamento de autointerferência perfeito e mesma carga nos enlaces de descida e subida. Dessa forma, é avaliada somente a interferência extra causada pelo *full duplex*, mediante a variação

da topologia, e consequentemente da densidade e distância média entre estações, e do tipo de antena utilizada. Para todas as topologias são considerados três terminais de usuário por célula e fator de carga de 20%. Na topologia macrocelular, a distância entre sítios é de 500 m; na *hotspot* ela é de 339 m, com *hotspot* de 100m de raio de cobertura. O *full duplex* analisado aqui é bidirecional e a vazão de dados total da rede nas direções de descida e subida em cada iteração de simulação é utilizada como métrica de desempenho. Dessa forma, a interferência extra que o *full duplex* causa para a direção de descida, a interferência entre terminais de usuário, e subida, entre estações base, terá um impacto direto nas taxas de dados alcançadas pelas estações e, consequentemente, na vazão total por iteração.

A Figura 4.1 mostra a distribuição cumulativa da vazão de dados agregada na direção de descida para cada uma das topologias e configurações de antena simuladas. É possível notar que a topologia que apresenta a maior vazão de dados é a *hotspot*, chegando a uma vazão média de 10,5 Gbps para o caso *full duplex* com conformação de feixe, contra 4,8 e 8,7 Gbps para as topologias macrocelular e *indoor*, respectivamente. Isso se dá pois, na topologia *hotspot*, a densidade de estações não é tão baixa quanto a da topologia macrocelular, reduzindo assim a distância entre estações conectadas e aumentando a potência de sinal recebida. Além disso, a topologia *hotspot* não apresenta densidade de estações tão alta quanto a da topologia *indoor*, tendo então menor interferência intercelular. Esse padrão se repete em todas as configurações de antena e tipos de duplexação, consolidando a distribuição em pequenas células como a mais adequada para comunicações em ondas milimétricas, dados os parâmetros e premissas seguidos neste trabalho.

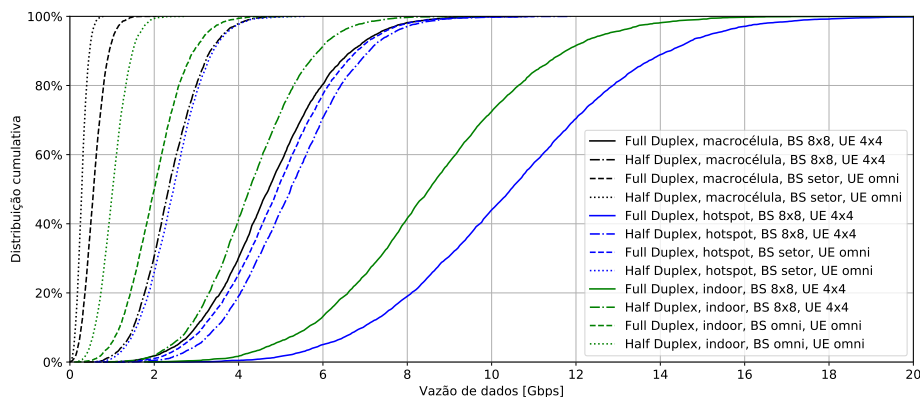


Figura 4.1: Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada na direção de descida em diversas topologias.

No que tange ao ganho do *full duplex*, nota-se que as topologias macrocelular e *hotspot* têm ambas um ganho de cerca de 100%, como pode ser visto na Figura 4.2. Na topologia *indoor*, na qual as células estão mais próximas umas das outras e a interferência entre terminais de usuário é mais significativa, esse ganho está um pouco, mas não muito, abaixo do ganho teórico de 100%. Isso mostra que, em ondas milimétricas na direção de descida, a interferência intercelular extra que terminais de usuário percebem quando operam em *full duplex* não é o suficiente para reduzir significativamente o ganho da tecnologia, quando comparada com o *half duplex*. Essa observação se torna mais evidente quando se leva em consideração o fato de que terminais de usuário transmitem

a baixas potências e têm altas perdas de propagação entre si nessas faixas de frequência.

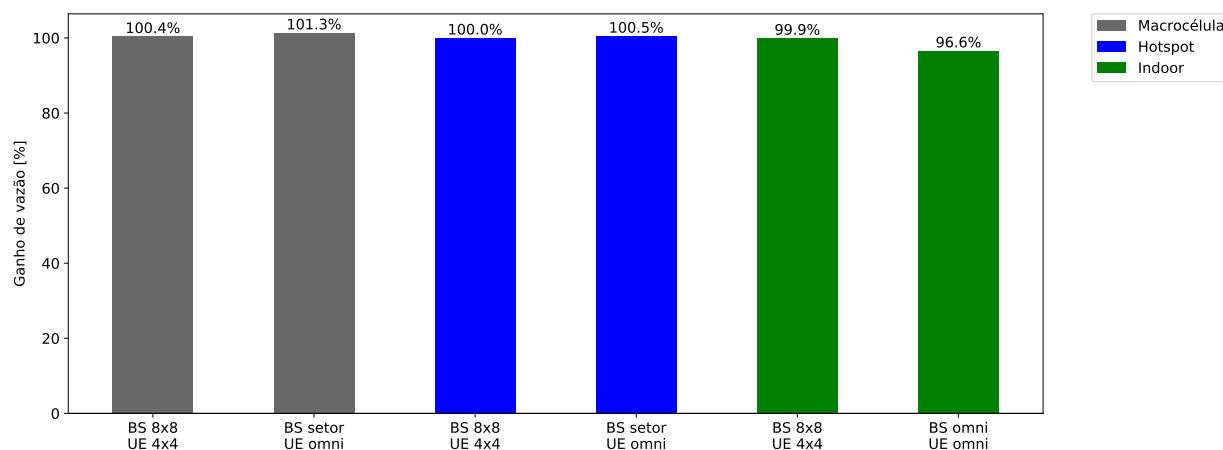


Figura 4.2: Ganho de vazão agregada média proporcionado pelo *full duplex* para a direção de descida.

A Tabela 4.1 mostra a razão sinal-ruído-interferência média nos enlaces de descida dos cenários simulados. A topologia que apresenta os piores níveis de sinal é a macrocelular, seguida pela *indoor* e pela *hotspot*, nessa ordem. A topologia macrocelular apresenta esse desempenho devido à maior distância entre os terminais de usuário e as estações base nessa topologia, enquanto na *indoor*, a potência de transmissão das estações base especificada pela UIT [84] é menor do que nos outros cenários, o que reduz a potência recebida pelos terminais de usuário. Os dados da Tabela 4.1 mostram que a interferência extra inserida pelo *full duplex* na direção de descida, a interferência entre terminais de usuário, é muito pequena quando comparada com outras fontes, uma vez que a diferença entre os valores de razão sinal-ruído-interferência para o *half duplex* e *full duplex* é muito pequena. A alta perda de propagação entre células e a baixa potência de transmissão dos terminais de usuário contribui para esse fato.

Tabela 4.1: Razão sinal-ruído-interferência média de descida para os cenários simulados.

		Macrocélula	Hotspot	Indoor
BS 8x8 UE 4x4	<i>half duplex</i>	10,4 dB	34,9 dB	26,2 dB
	<i>full duplex</i>	10,5 dB	34,9 dB	26,2 dB
BS setor/omni UE omni	<i>half duplex</i>	-15,9 dB	8,4 dB	-2,9 dB
	<i>full duplex</i>	-16,0 dB	8,5 dB	-3,6 dB

Na direção de subida a interferência extra causada pelo *full duplex* tem consequências mais visíveis. Mais uma vez, as topologias *hotspot* e *indoor* apresentam melhor desempenho, enquanto a macrocelular tem os menores níveis de vazão das três topologias, como pode ser visto na Figura 4.3. Como terminais de usuário transmitem com potências menores e têm taxa de dados máxima menores do que estações base, a vazão na direção de subida é menor que que a vazão na de descida.

A Figura 4.4 mostra o ganho de vazão média proporcionado pelo *full duplex* para a direção de subida. Para a topologia macrocelular, a interferência entre setores de um mesmo sítio reduz

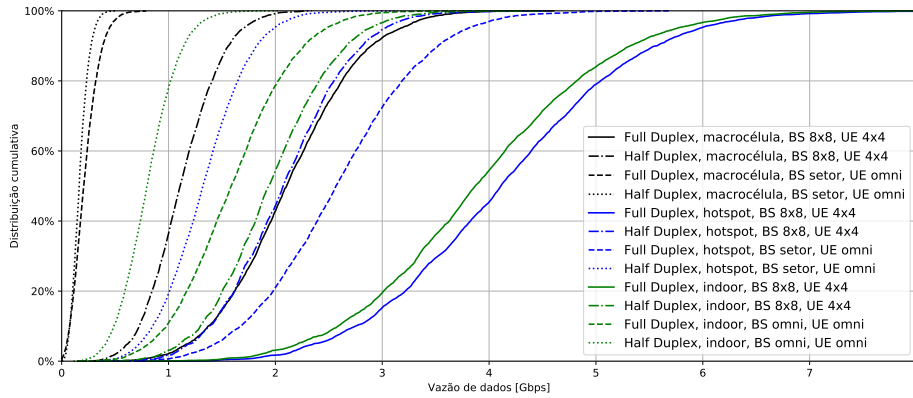


Figura 4.3: Distribuição cumulativa da vazão de dados de subida agregada em diversas topologias.

significativamente o ganho do *full duplex*, especialmente quando não é empregada conformação de feixes. Quando comparado com enlace de descida, o ganho do *full duplex* na direção de subida é menor para as topologias macrocelular e *hotspot*, sugerindo que nessas topologias a interferência entre estações base é mais significativa do que a interferência entre terminais de usuário. Além disso, a topologia *indoor* se sobressai no ganho de vazão média de subida, sugerindo que a maior proximidade entre terminais de usuário faz com que a interferência entre eles seja mais relevante do que a interferência entre estações base.

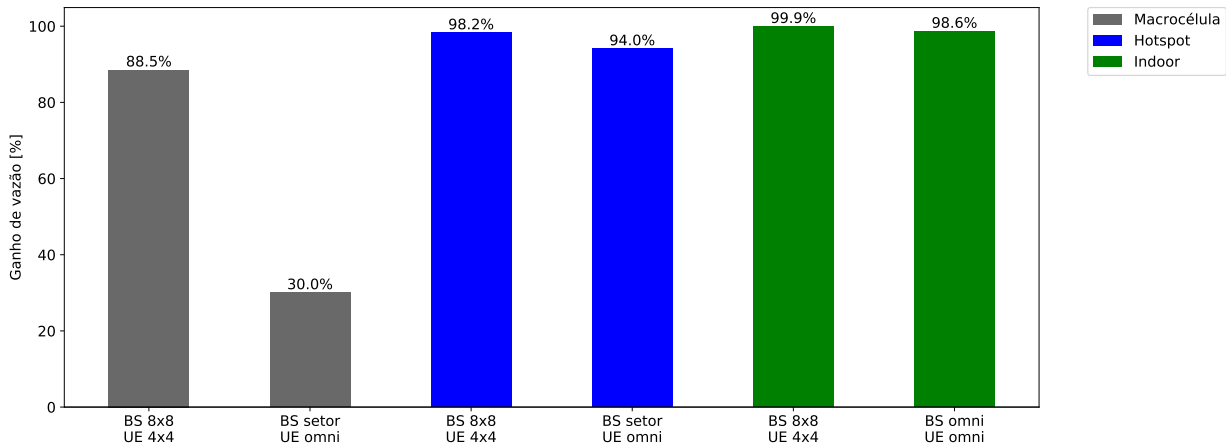


Figura 4.4: Ganho de vazão agregada média proporcionado pelo *full duplex* para a direção de subida.

Ao se analisar a razão sinal-ruído-interferência média de subida dos cenários simulados, mostrada na Tabela 4.2, é possível perceber como a interferência extra impacta a qualidade do sinal recebido pelas estações base. Os valores de razão sinal-ruído-interferência obtidos para o *full duplex* são menores do que os obtidos para o *half duplex*, demonstrando assim que a interferência entre estações base pode dominar a interferência total no *full duplex*. No caso da topologia macrocelular sem painel de antenas, por exemplo, a razão sinal-ruído-interferência média é quase 30 dB menor para o *full duplex* do que para o *half duplex*, principalmente devido a interferência entre setores em um mesmo sítio. Mais uma vez, as topologias que se destacaram foram a *hotspot* e a *indoor*,

com a topologia macrocelular apresentando os piores níveis de sinal.

Tabela 4.2: Razão sinal-ruído-interferência média de subida para os cenários simulados.

		Macro célula	Hotspot	Indoor
BS 8x8	<i>half duplex</i>	5,7 dB	15,1 dB	14,7 dB
UE 4x4	<i>full duplex</i>	3,7 dB	14,7 dB	14,7 dB
BS setor/omni	<i>half duplex</i>	-17,2 dB	5,8 dB	-0,5 dB
UE omni	<i>full duplex</i>	-44,2 dB	4,7 dB	-0,7 dB

Dados os resultados acima, é possível concluir que as topologias *hotspot* e *indoor* são as mais adequadas para se utilizar o *full duplex* em ondas milimétricas. Por isso, as simulações apresentadas nas próximas seções utilizarão essas topologias. Mais do que isso, ganhos de vazão iguais ou muito próximos de 100% podem ser alcançados pelo *full duplex* com cancelamento de autointerferência perfeito e carga equilibrada. Essas são, no entanto, premissas inverossímeis, de forma que o ganho do *full duplex* em situações mais realistas é avaliado a seguir.

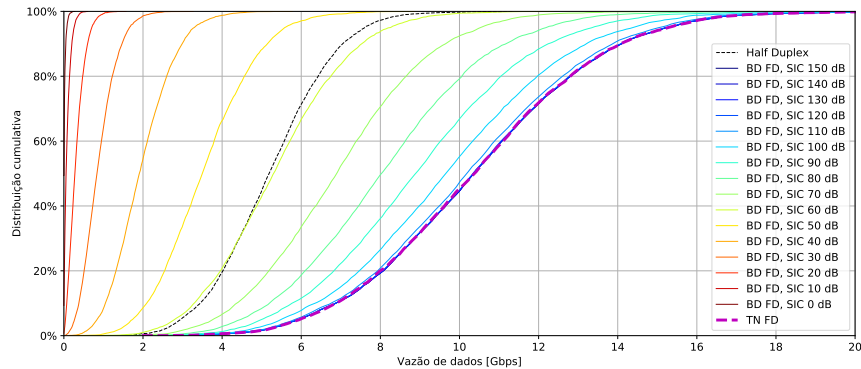
4.3 Cancelamento de autointerferência

Nesta seção é avaliado o impacto do cancelamento da autointerferência no ganho do *full duplex*. Além disso, o *full duplex* bidirecional é comparado ao *full duplex* de três nós para se determinar qual dos dois tipos de duplexação tem melhor desempenho. Para os resultados mostrados aqui, a topologia utilizada foi a *hotspot* com painéis de antenas de 64 elementos (8x8) para as estações base e 16 elementos (4x4) para os terminais de usuário.

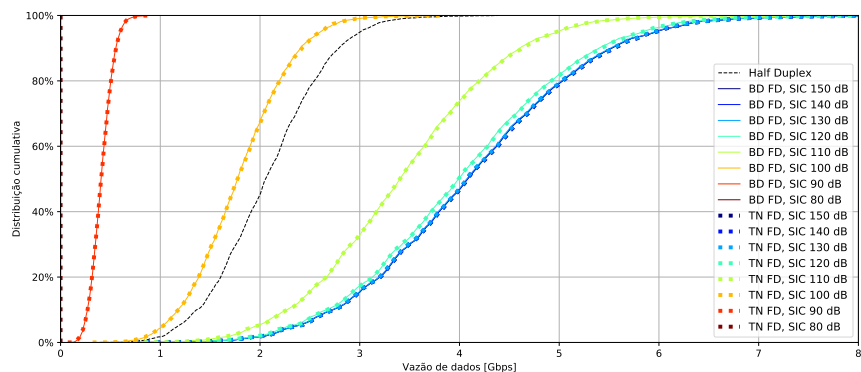
A Figura 4.5 mostra uma comparação entre esses dois casos, ilustrando a vazão agregada nas direções de descida e subida para diversos valores de cancelamento de autointerferência (SIC). Embora alguns dos valores utilizados estejam muito além dos valores de cancelamento obtidos até hoje, o objetivo dessa análise é levantar o nível de cancelamento para o qual o *full duplex* é mais vantajoso do que o *half duplex*. Sendo assim, foram realizadas simulações com uma ampla distribuição de capacidades de cancelamento, mesmo que longe do que é realista atualmente, de forma a se encontrar esse nível.

Para o enlace de descida, mostrado na Figura 4.5(a), o cancelamento de autointerferência dos terminais de usuário não altera a vazão do *full duplex* de três nós (TN FD, *three node full duplex*), uma vez que nesse cenário somente as estações base operam em *full duplex*. Já a vazão do *full duplex* bidirecional (BD FD, *bidirectional full duplex*) aumenta na medida em que se aumenta o cancelamento de autointerferência, sendo 60 dB de cancelamento o valor a partir do qual a vazão do *full duplex* é maior que a do *half duplex*. Esses resultados mostram que, para enlace de descida, como a interferência entre terminais de usuário é relativamente pequena, devido à alta perda de propagação em ondas milimétricas, menor potência de transmissão e utilização de conformação de feixes, é mais vantajoso se ter *full duplex* somente nas estações base. Assim, a autointerferência sofrida pelos terminais de usuário no *full duplex* bidirecional é substituída por interferência intra e intercelular entre terminais de usuário, que tem um impacto pequeno na vazão de dados.

Para enlace de subida, mostrado na Figura 4.5(b), o cancelamento de autointerferência das estações base apresenta um maior impacto na vazão de dados, de forma que cancelamentos abaixo de 80 dB anulam completamente a vazão do *full duplex*. Na direção de subida, o *full duplex* só se mostra vantajoso para valores de cancelamento acima de cerca de 100 dB, tanto para o *full duplex* bidirecional como para o de três nós. Mais do que isso, para os mesmos valores de cancelamento, essas duas formas de duplexação apresentam valores de vazão muito próximos, como pode ser visto na figura.



(a) Descida



(b) Subida

Figura 4.5: Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada nas direções de a)descida e b)subida para diversos valores de cancelamento de autointerferência.

Na Figura 4.6 o ganho de vazão de dados do *full duplex* é mostrado em função do cancelamento de autointerferência. Para enlace de descida do *full duplex* de três nós, no qual os terminais de usuário não empregam *full duplex* e, conseqüentemente, não têm que lidar com a autointerferência, o ganho do *full duplex* está sempre próximo de 100%. Para o *full duplex* bidirecional, no entanto, o ganho de vazão somente se torna positivo a partir de cerca de 60 dB de cancelamento de autointerferência, como mostrado nas figuras anteriores. O ganho na direção de subida dos dois tipos de *full duplex* é muito próximo. Esses resultados mostram que o maior valor de cancelamento de autointerferência encontrado na literatura, 110 dB, não é o suficiente para promover um ganho de 100% para o *full duplex* nos cenários aqui simulados. Devido às baixas potências dos sinais recebidos pelas estações base nessas faixas de frequência, somente cancelamentos acima de 120 dB alcançam ganhos próximos de 100%.

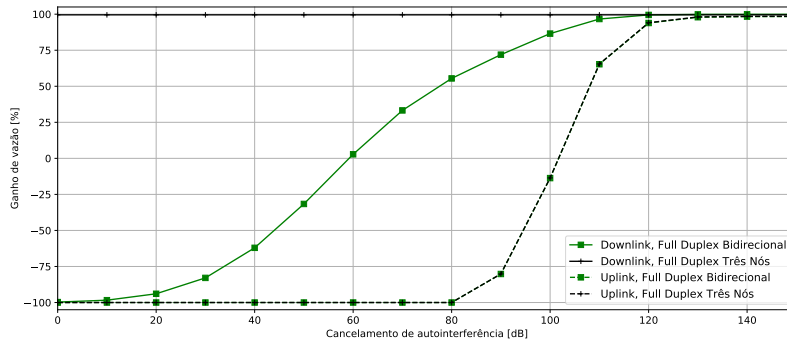


Figura 4.6: Ganho de vazão agregada média versus cancelamento de autointerferência.

Os resultados apresentados acima indicam que, exceto em casos em que o cancelamento de autointerferência chega a cerca de 100 dB, não existe vantagem em empregar a *full duplex* também nos terminais de usuário. A interferência entre terminais de usuário da mesma célula e de células vizinhas se mostra pequena principalmente devido à alta perda de propagação observada em ondas milimétricas e a possibilidade de se utilizar conformação de feixe com painéis de muitos elementos. Mais do que isso, o controle de potência empregado pelos terminais de usuário ajuda a reduzir a interferência e a aumentar o ganho de vazão do *full duplex*. Sendo assim, os próximos resultados apresentados utilizarão o *full duplex* de três nós com cancelamento de autointerferência de 110 dB nas estações base.

4.4 Desequilíbrio de carga

Em todos os casos analisados até agora, a quantidade de enlaces ativos por iteração de simulação foi a mesma para as direções de descida e subida. Agora serão analisados casos em que a rede passa mais tempo na direção de descida do que de subida, para o caso do *half duplex*, ou em que há mais enlaces da estação base para o terminal de usuário (descida) do que o contrário, para o *full duplex*. Como a demanda dos terminais de usuário por recepção de dados é maior do que a por transmissão de dados, é natural que redes de telefonia móvel passem mais tempo operando na direção de descida, quando utilizando duplexação por divisão no tempo, ou que tenham mais transmissões na direção de descida, quando em *full duplex*.

Nas simulações apresentadas aqui o fator de carga é mantido constante em 20%. Para o *half duplex*, isso significa 20% dos enlaces de descida ou subida, a depender da direção em que a rede está operando, estão ativos em uma iteração de simulação; enquanto para o *full duplex* isso significa 20% dos enlaces totais estão ativos em uma iteração. A proporção de quanto tempo a rede passa na direção de descida em comparação com a subida, para o *half duplex*, ou a proporção da quantidade de enlaces na direção de descida em comparação com a subida, para o *full duplex*, varia de 1:1 (mesma carga nas duas direções) até 8:1 (descida com oito vezes mais carga que subida) nos resultados a seguir.

A distribuição cumulativa da vazão agregada de dados de descida e subida para diversas distri-

buições de carga é mostrada na Figura 4.7. Como a proporção de enlaces ativos em cada direção no *full duplex* é igual à proporção de tempo que a rede passa em cada direção no *half duplex*, o ganho de vazão que o *full duplex* proporciona se mantém perto de 100% para os enlaces de descida e de 65% para os de subida. Esse ganho não chega a 100% na subida devido primariamente à autointerferência nas estações base. Além disso, a vazão de dados na direção de descida aumenta à medida em que o desequilíbrio de carga aumenta a favor denlace de descida, enquanto o efeito inverso é observado na vazão de subida.

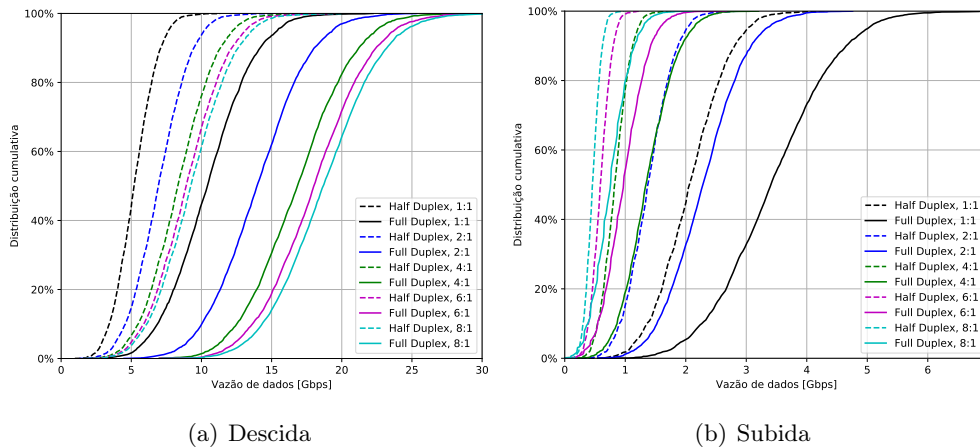


Figura 4.7: Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada nas direções de a)descida e b)subida para diversos valores de distribuição de carga.

Análises mais interessantes podem ser feitas quando se observa a vazão dos enlaces individuais, mostrada na Figura 4.8. Nela vemos que, apesar de o *full duplex* proporcionar um ganho de vazão total na descida próximo de 100%, devido à maior quantidade de enlaces operando ao mesmo tempo nessa direção, os enlaces individuais não chegam a usufruir tanto do *full duplex*. Na verdade, o ganho em vazão que cada enlace experiencia varia de 99,5%, no caso 1:1, para 11,6%, no caso 8:1. Isso se dá em razão de que, à medida que o desequilíbrio aumenta na direção de descida, estações base em *half duplex* passam mais tempo operando na direção de descida e, conseqüentemente, o tempo em que elas passam nessa direção se aproxima do tempo de estações operando em *full duplex*.

O inverso acontece para enlace de subida, no qual o ganho de vazão dos enlaces aumenta à medida que o desequilíbrio aumenta, já que em *half duplex* estações têm menos tempo para transmitir em cenários de maior desequilíbrio de carga. Vale ressaltar que, como os resultados apresentados aqui são obtidos por meio de simulações estáticas, considera-se que as estações sempre terão dados para transmitir durante todo o tempo alocado a elas. Isso caracteriza um modelo de tráfego de *buffer* cheio, e, por consequência, há uma superestimação do ganho do *full duplex*. Em cenários mais realistas, o ganho do *full duplex* pode ser limitado por características de tráfego da rede, e não meramente por interferência.

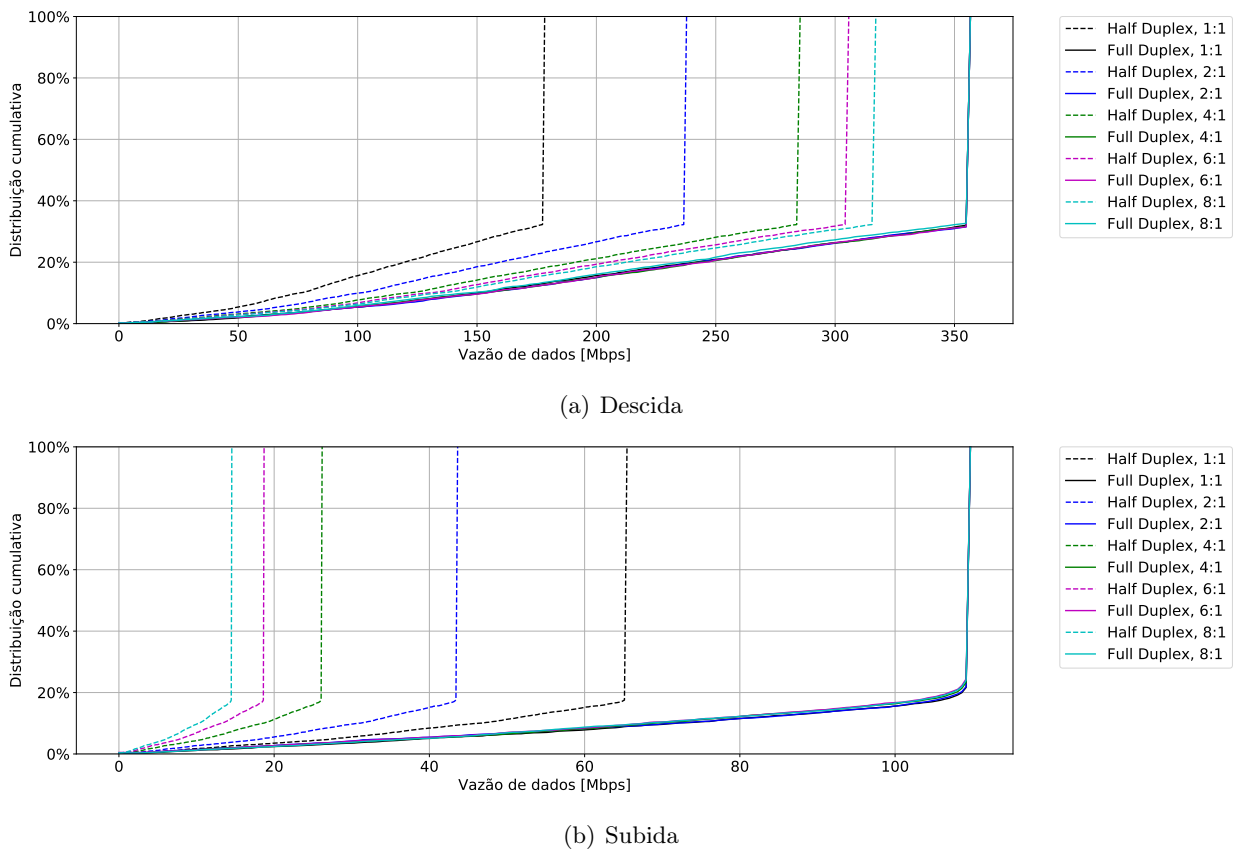


Figura 4.8: Distribuição cumulativa da vazão de dados dos enlaces de a)descida e b)subida para diversos valores de distribuição de carga.

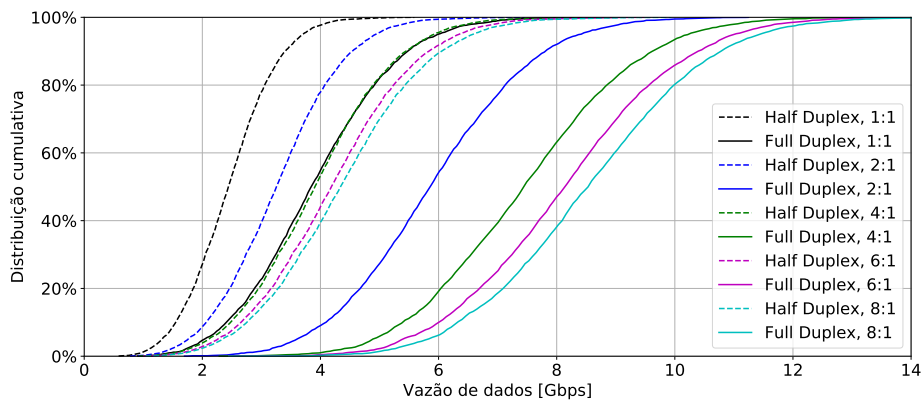
4.5 Caso de alta interferência

Nessa seção é apresentado um conjunto de resultados extremo, no qual as estações da topologia *hotspot* utilizam *full duplex* somente nas estações base, com antenas simples sem conformação de feixe (setorizada nas estações base e isotrópica nos terminais de usuário), cancelamento de autointerferência de 110 dB e carga desequilibrada. Na Figura 4.9, por exemplo, a distribuição cumulativa e os ganhos de vazão do *full duplex* são apresentados para a direção de descida. É possível notar que o *full duplex* se torna mais vantajoso à medida que o desequilíbrio aumenta, já que há menos terminais de usuário transmitindo e, conseqüentemente, menos interferência entre eles. Nesse caso, em que os terminais de usuário utilizam antenas isotrópicas, a interferência entre eles se mostra mais significativa, e pode ter um impacto visível nos ganhos do *full duplex*.

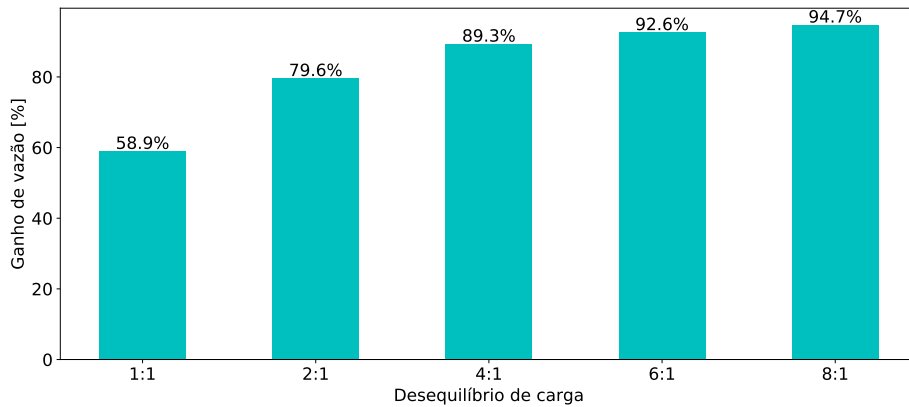
Para o enlace de subida, mostrado na Figura 4.10, a autointerferência nas estações base, somada à maior interferência devido ao uso de antenas pouco diretivas, faz com que o ganho do *full duplex* se mantenha em torno de 58%. Comparado aos casos análogos apresentados na Seção 4.2, os apresentados aqui mostram que o *full duplex* pode não chegar aos teóricos 100% de ganho se há desequilíbrio de carga, cancelamento imperfeito de autointerferência, não é utilizada a conformação de feixes ou os terminais de usuário não operam em *full duplex*.

Dadas as análises executadas neste capítulo, o *full duplex* se mostra mais vantajoso quando

empregado nas topologias *hotspot* e *indoor* com conformação de feixes. Outras fontes na literatura chegaram a conclusões semelhantes [98][89], corroborando assim para a confirmação das conclusões aqui apresentadas. Além disso, empregar o *full duplex* somente nas estações base é mais vantajoso do que utilizar o *full duplex* bidirecional, uma vez que altos níveis de cancelamento de autointerferência, que justificariam o emprego de *full duplex* nos terminais de usuário, requerem mudanças significativas de *hardware* que acarretariam em aumento do custo e do consumo energético dos dispositivos móveis [30]. Por isso, células pequenas, nas topologias *hotspot* e *indoor*, e *full duplex* de três nós farão parte das configurações utilizadas nos próximos resultados apresentados, exceto quando especificado o contrário. Também serão utilizados o maior valor de cancelamento de autointerferência encontrado na literatura, 110 dB, e o desequilíbrio de carga sugerido pela UIT, de 80% para a direção de descida e 20% para a de subida, ou seja, 4:1.

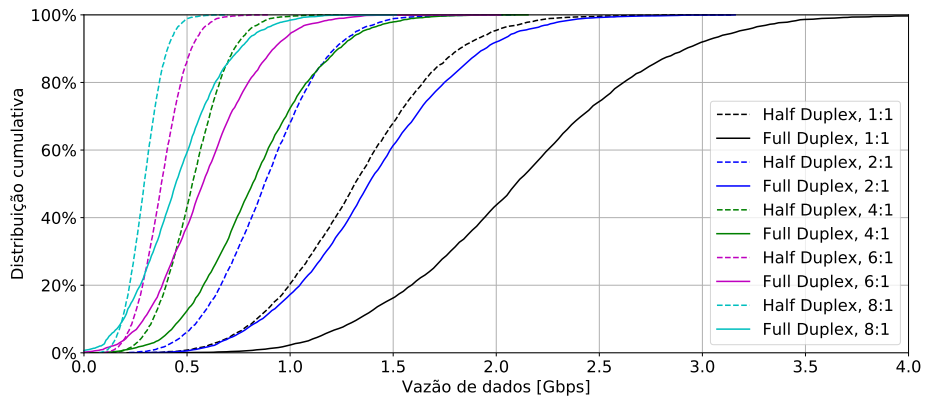


(a) Vazão de dados

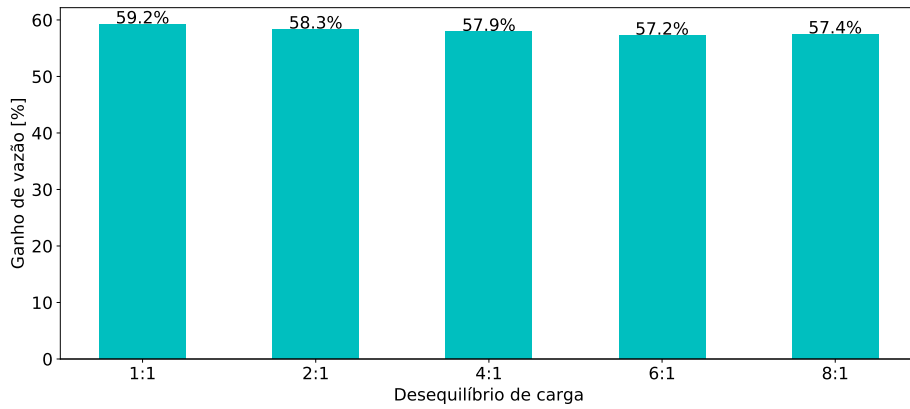


(b) Ganho de vazão

Figura 4.9: a) Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada e b) ganho de vazão agregada média proporcionado pelo *full duplex* para a direção de descida.



(a) Vazão de dados



(b) Ganho de vazão

Figura 4.10: a) Distribuição cumulativa da vazão de dados agregada e b) ganho de vazão média proporcionado pelo *full duplex* para a direção de subida.

Capítulo 5

Estudos de convivência

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados estudos de convivência do IM-2020 com os sistemas de satélite fixo e radioastronomia. São realizadas simulações do IMT-2020 convivendo com a estação espacial do serviço de satélite fixo na faixa de 27-27,5 GHz, com as estações terrestre e terminal de usuário do serviço de satélite fixo em 37-42,5 GHz e com a estação de radioastronomia em 42,5-43,5 GHz. O objetivo final é responder à questão problema estabelecida no Capítulo 1 e definir em que condições a interferência causada pelos sistemas de telefonia de quinta geração estará abaixo dos critérios de proteção dos sistemas existentes. As simulações apresentadas aqui utilizaram os cenários em que o *full duplex* tem um melhor desempenho, uma vez que são aqueles com maiores chances de serem implementados, como discutido no Capítulo 4. Exceto quando especificado o contrário, a topologia empregada pelo IMT é a *hotspot*.

5.2 Compartilhamento com o serviço de satélite fixo

Quando se avalia a convivência de redes de comunicação móvel com estações satelitais, tem-se como objetivo definir se a interferência sofrida pelos sistemas está dentro de níveis aceitáveis. Nesse trabalho isso é feito para três valores de elevação da estação espacial, 20°, 45° e 90°. Com relação à estação terrestre, o foco está em definir uma distância de separação mínima a partir da qual a interferência que o IMT-2020 causa à estação está abaixo dos critérios de proteção. Já para o terminal de usuário do serviço de satélite fixo definir essa distância não é tão simples, uma vez que o usuário pode posicionar a sua estação em qualquer ambiente sem necessariamente informá-lo às agências reguladoras. Por isso, para se permitir o compartilhamento de frequência, são estabelecidas restrições de uso para o IMT, como limitar a potência de transmissão ou o ambiente (*indoor* ou *outdoor*) de operação.

5.2.1 Compartilhamento com a estação espacial

A Figura 5.1 mostra a distribuição cumulativa da razão interferência-ruído da estação espacial do serviço de satélite fixo na faixa de 27-27,5 GHz para três ângulos de elevação: 20° , 45° e 90° . A figura mostra também o critério de proteção do sistema, $-10,5$ dB. Os resultados apresentados foram obtidos com simulações de 500 iterações e pós-processamento para cálculo da interferência agregada na área de cobertura do satélite com 5000 amostras. Além disso, foi utilizado desequilíbrio de carga de 4:1 em todos os cenários simulados.

Em todos os casos analisados, a interferência medida está bem abaixo do critério de proteção, o que sugere que essa faixa de frequência pode ser compartilhada pelos dois sistemas sem que haja degradação do serviço de satélite fixo. Mais do que isso, é possível perceber que, embora o *full duplex* cause mais interferência à estação espacial do que o *half duplex*, ele não impossibilita o compartilhamento de espectro entre os dois serviços. Esses resultados estão de acordo com o que foi observado na literatura [77].

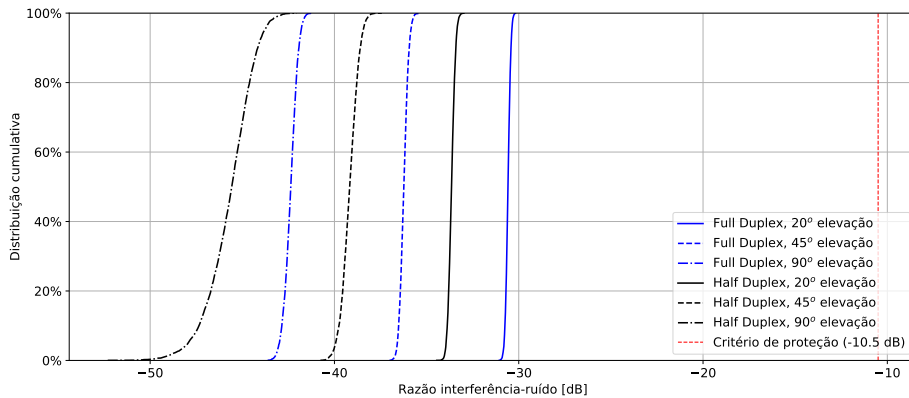


Figura 5.1: Distribuição cumulativa da razão interferência-ruído da estação espacial.

A Figura 5.2 mostra a distribuição de amostras de razão interferência-ruído obtidas diretamente por simulação, ou seja, antes do pós-processamento para cálculo da interferência em grandes áreas. Os resultados da figura são obtidos por meio da simulação de uma rede IMT com área igual à área de cobertura do satélite mas que contém menos estações do que o previsto para essa área. Por isso, os valores de razão interferência-ruído da Figura 5.2 são bem inferiores aos da Figura 5.1. O pós-processamento descrito na Seção 3.3.1.4 visa escalonar esses resultados para que seja considerado um número de estações igual ao previsto para a área de cobertura, seguindo as densidades de distribuição de estações previstas pela UIT.

A Tabela 5.1 mostra os parâmetros desse pós-processamento. Para cada uma das técnicas de duplexação simuladas (*half duplex* e *full duplex*), dado o fator de segmento \mathcal{S} obtido para cada uma das elevações, \mathcal{S} amostras das distribuições da Figura 5.2 são escolhidas aleatoriamente para compor uma amostra de distribuição da Figura 5.1. No caso do *half duplex*, 80% das \mathcal{S} amostras de simulação (Figura 5.2) correspondem ao IMT operando na direção de descida e 20% ao IMT operando na de subida, de forma a se respeitar a proporção de 4:1 para operação do TDD em cada uma das direções. No caso do *full duplex* as amostras vêm todas da mesma distribuição de

resultados, uma vez que nessas simulações enlaces das duas direções são simulados simultaneamente respeitando o desequilíbrio de carga da rede. Todas as \mathcal{S} amostras são então somadas para se formar uma amostra de resultado final. Esse processo é repetido 5000 vezes e as distribuições cumulativas da Figura 5.1 são montadas.

Tabela 5.1: Parâmetros do pós-processamento para grandes áreas para a estação espacial.

Parâmetro	Valor		
	90°	45°	20°
Elevação	90°	45°	20°
Área de cobertura [km ²]	130.097	305.428	486.286
Densidade de estações[BSs/km ²]	30 (urbano) e 10 (suburbano)		
R_a	7% (urbano) e 3% (suburbano)		
R_b	5%		
Visibilidade	0,65°		
Eficiência da antena no ângulo de visibilidade	101%		
Distância entre sítios IMT [m]	33.608	41.815	64.976
Número de BSs total	15.612	24.167	58.354
Número de BSs simulado	399		
Fator de segmento \mathcal{S}	39	61	146

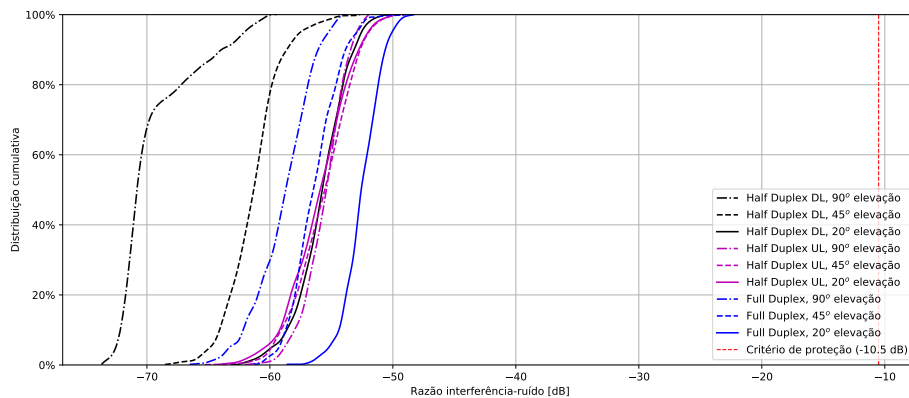


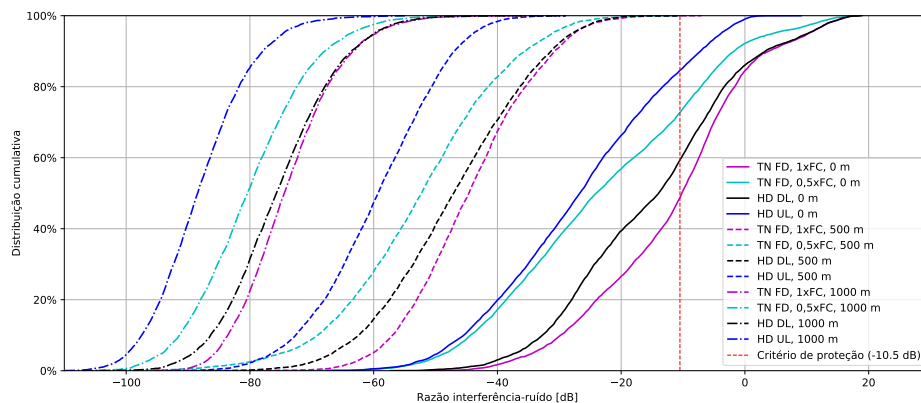
Figura 5.2: Distribuição cumulativa das amostras de razão interferência-ruído obtidas por simulação.

5.2.2 Compartilhamento com a estação terrestre

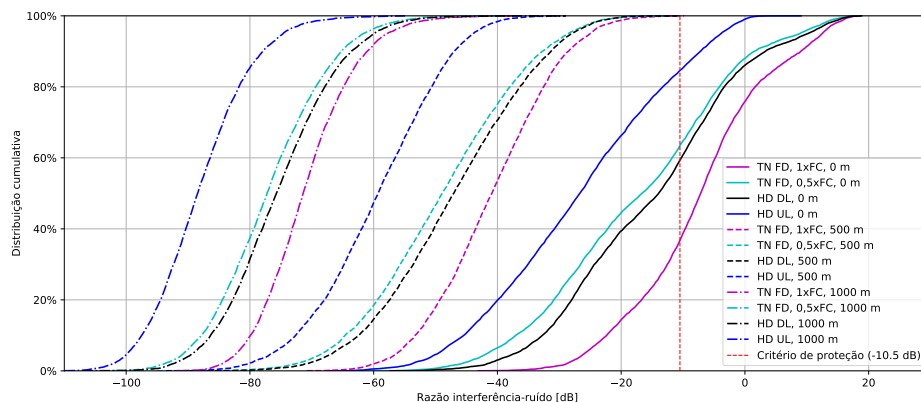
A Figura 5.3 mostra a distribuição cumulativa da razão interferência-ruído da estação terrestre na faixa de 37-42,5 GHz para o IMT com desequilíbrio de carga de 1:1 e 4:1 e três distâncias de separação entre os sistemas: 0 m, 500 m e 1000 m. Na Figura, 0 m corresponde ao caso em que a estação terrestre está posicionada na borda da rede IMT e as demais distâncias correspondem à separação entre a estação terrestre e a borda da rede. Esse cenário foi ilustrado pela Figura 3.16.

Para o *full duplex* foram simulados dois casos, com o *full duplex* operando com o mesmo fator de carga do *half duplex* (1xFC) e com metade desse fator de carga (0.5xFC). Com isso, pode-se avaliar cenários em que a vazão de dados do *full duplex* é próxima da do *half duplex*, com metade dos enlaces ativos em uma iteração de simulação, porém pelo dobro do tempo. Nesses cenários, espera-se existe a possibilidade do *full duplex* causar menos interferência do que o *half duplex*, como será explicado mais adiante.

Como pode ser visto na Figura 5.3, uma separação de 500 m garante que a interferência esteja abaixo do critério de proteção do serviço de satélite fixo para o IMT operando em *half duplex*. O *half duplex* causa mais interferência na direção de descida do que de subida, o que faz sentido quando se considera que as estações base operam com maior potência e estão posicionadas em maiores alturas do que os terminais de usuário. Por isso, quando se reduz o fator de carga do *full duplex* para a metade do fator do *half duplex*, a interferência que o *full duplex* causa é ainda menor que a causada pelo *half duplex* na direção de descida, uma vez que se têm menos estações base transmitindo simultaneamente, mesmo que por mais tempo. Por esse mesmo motivo, aumentar o desequilíbrio de carga do *full duplex* na direção de descida aumenta a interferência causada pela rede IMT.



(a) 1:1



(b) 4:1

Figura 5.3: Distribuição cumulativa da razão interferência-ruído da estação terrestre para IMT com desequilíbrio de carga de a) 1:1 e b) 4:1

A Tabela 5.2 mostra a percentual de casos simulados nos quais a razão interferência-ruído ultrapassa o critério de proteção para os resultados acima. No caso em que o IMT opera em *full duplex* com fator de carga igual ao do *half duplex*, uma pequena porcentagem dos casos simulados, cerca de 0,02%, apresentou níveis de interferência acima do aceitável. Para distância de separação de 1000 m, no entanto, não houve nenhum caso em que a interferência se mostrou acima do aceitável.

Tabela 5.2: Percentual de casos simulados com razão interferência-ruído acima do critério de proteção da estação terrestre.

		1:1			4:1		
		0 m	500 m	1000 m	0 m	500 m	1000 m
Full Duplex	1xFC	49,83%	0,02%	—	62,77%	0,02%	—
	0,5xFC	26,99%	—	—	36,23%	—	—
Half Duplex	Descida	39,87%	—	—	39,87%	—	—
	Subida	14,93%	—	—	14,93%	—	—

Os resultados acima sugerem que, para um fator de carga igual à metade do fator do *half duplex*, o que a princípio significa uma vazão de dados igual ou próxima da do *half duplex*, o *full duplex* pode causar menos interferência do que o *half duplex*. Para testar essa hipótese, é importante observar o ganho de vazão agregada do *full duplex* nas situações de compartilhamento com a estação terrestre, como mostrado na Figura 5.4. Na direção de descida, mostrada na Figura 5.4(a), o *full duplex* alcança os 100% de ganho teóricos quando opera com o mesmo fator de carga do *half duplex* e tem praticamente a mesma vazão que o *half duplex* quando opera com a metade do fator de carga, ou seja, não apresenta ganho de vazão.

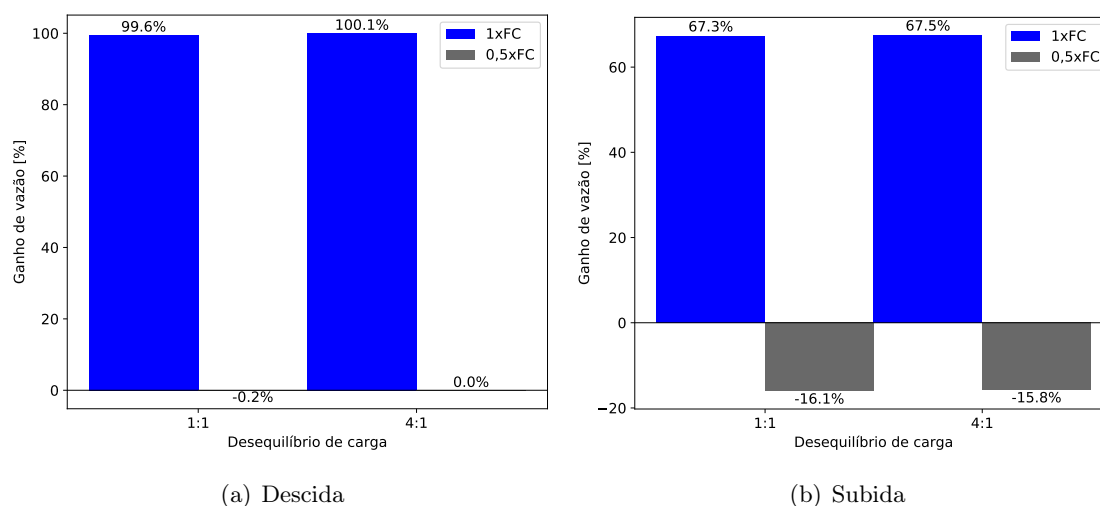


Figura 5.4: Ganho de vazão agregada do *full duplex* para os cenários de compartilhamento com estação terrestre.

Já na direção de subida, há uma redução de cerca de 16% na vazão do *full duplex* operando com metade do fator de carga. A autointerferência nas estações base é o principal responsável

por essa redução, de forma que, mesmo com o mesmo fator de carga que o *half duplex*, o *full duplex* não chega ao ganho almejado de 100%. Esses resultados indicam que, às custas de uma redução na vazão de dados de subida, o *full duplex* pode reduzir a interferência sofrida pela estação terrestre e apresentar valores de vazão de dados comparáveis com o *half duplex*. Melhores valores de cancelamento de autointerferência nas estações base podem reduzir a queda de vazão observada.

5.2.3 Compartilhamento com o terminal de usuário do serviço de satélite fixo

No que tange ao compartilhamento do IMT-2020 com os terminais de usuário do serviço de satélite fixo, também na faixa de 37-42,5 GHz, foram alcançados os resultados mostrados na Figura 5.5. Nela, podemos ver a distribuição cumulativa da razão interferência-ruído do terminal de usuário do serviço de satélite fixo para IMT nas topologias *hotspot* e *indoor*. Inicialmente, foram obtidos os resultados mostrados na Figura 5.5(a), na qual o IMT opera na topologia *hotspot* com a maioria das estações fora de prédios. A figura mostra que, para cerca de 20% dos casos simulados, a interferência medida está acima do critério de proteção do serviço de satélite fixo, especialmente quando o *full duplex* opera com desequilíbrio de carga de 4:1 a favor da direção de descida.

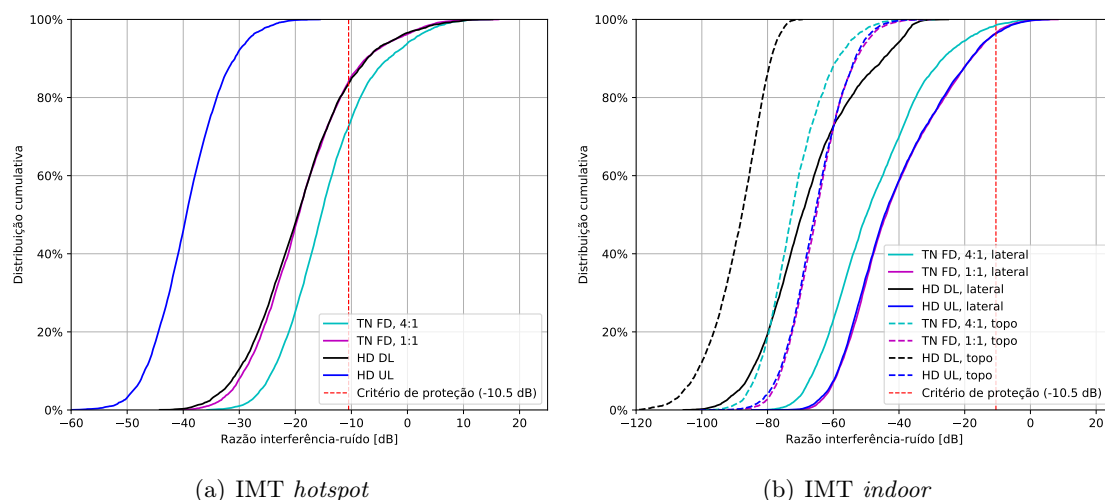


Figura 5.5: Distribuição cumulativa da razão interferência-ruído do terminal de usuário do serviço de satélite fixo para IMT nas topologias a) *hotspot* e b) *indoor*.

Impondo-se a restrição de que as estações base do sistema IMT sejam instaladas *indoor*, temos os resultados da Figura 5.5. Neles, são mostrados níveis de interferência para o terminal de usuário localizado no topo ou lateral do prédio, também para o *full duplex* operando com desequilíbrio de carga de 4:1 e 1:1. Esses resultados mostram que, quando no topo do prédio, o terminal de usuário do serviço de satélite fixo está livre de interferência do IMT-2020 operando *indoor*. Quando na lateral do prédio, a interferência está acima do critério de proteção para menos de 4% dos casos simulados, de forma que técnicas simples de mitigação de interferência caso a caso, como a utilização de blindagens eletromagnéticas, podem permitir a convivência.

É interessante notar que, quando o IMT opera *outdoor* (Figura 5.5(a)), os enlaces de descida causam mais interferência no terminal de usuário do serviço de satélite fixo do que os de subida.

Isso acontece pois as estações base transmitem com potências maiores e estão em posições mais altas do que os terminais de usuário do IMT. Na topologia *indoor*, no entanto, as estações base transmitem com potências menores e, devido a maior densidade de estações dentro dos prédios, os enlaces de subida causam mais interferência à estação do serviço de satélite fixo. Como nessa topologia essa estação se encontra mais próxima dos terminais de usuário do IMT, ela sofre mais interferência desses terminais, cujos feixes estão apontados para cima, para as estações base que os servem.

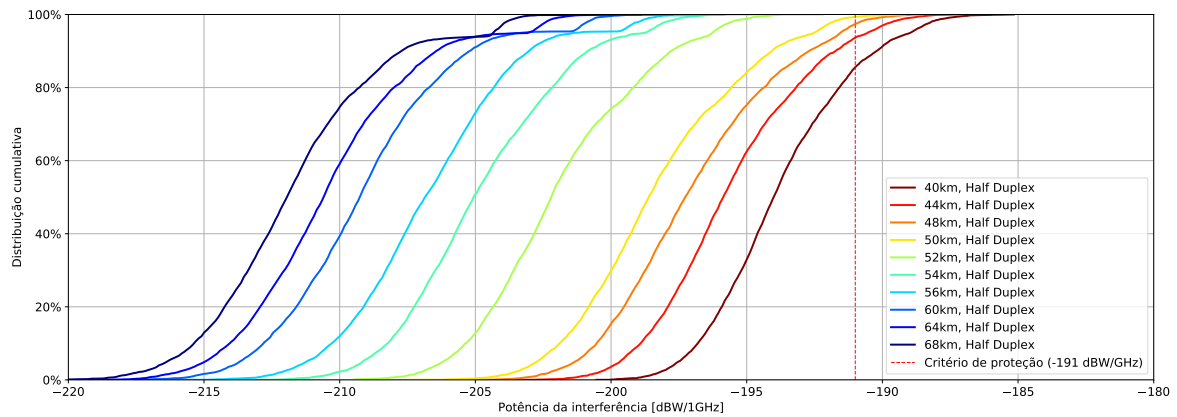
5.3 Compartilhamento com a radioastronomia

A Figura 5.6 mostra a interferência total na faixa de 42,5-43,5 GHz do serviço de radioastronomia para o IMT operando em *half duplex* e *full duplex* para diversos valores de zona de exclusão. Ao se comparar as Figuras 5.6(a) e 5.6(b), fica evidente que o *full duplex* causa mais interferência do que o *half duplex*, de forma que zonas de exclusão maiores são necessárias. Levando em consideração o cenário com o *full duplex*, de maior interferência, uma zona de exclusão de pelo menos 54 km é necessária para garantir a proteção do serviço de radioastronomia. Para o *half duplex*, no entanto, 52 km de zona de exclusão já se mostram suficientes para proteger o sistema passivo.

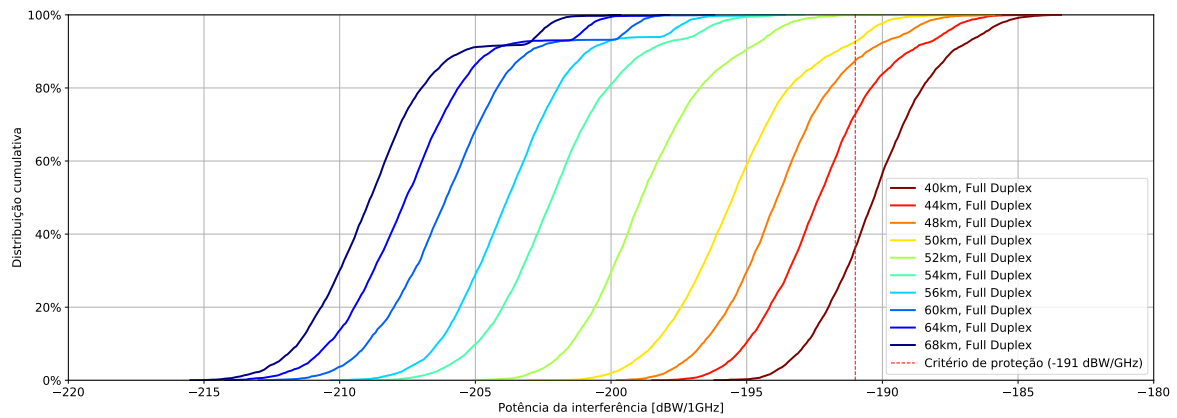
A Tabela 5.3 mostra o percentual de casos simulados nos quais a interferência se mostrou acima do critério de proteção. Nela é possível notar que, para uma mesma distância, o *full duplex* apresenta mais casos com interferência danosa à estação de radioastronomia do que o *half duplex*. Mesmo para a distância de 52 km, num percentual bem pequeno, de 0,02% dos casos simulados, o sistema IMT-2020 operando em *full duplex* causa interferência danosa ao sistema de radioastronomia. Tanto para o *full duplex* como para o *half duplex*, nenhuma das amostras de interferência ultrapassa -191 dBW quando a zona de exclusão é maior do que 54 km.

Tabela 5.3: Percentual de casos simulados com interferência acima do critério de proteção

	40 km	44 km	48 km	50 km	52 km	54 km
Half duplex	15,09%	7,58%	2,45%	0,91%	0,00%	0,00%
Full duplex	64,13%	25,22%	12,52%	7,34%	0,02%	0,00%



(a) *half duplex*



(b) *full duplex*

Figura 5.6: Distribuição cumulativa da interferência na banda do serviço de radioastronomia para o IMT operando em a) *half duplex* e b) *full duplex*.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Considerações gerais

Dadas as estimativas de crescimento de tráfego de dados e número de usuários de serviços de comunicações celulares, novas tecnologias e faixas de frequência devem ser utilizadas na próxima geração de comunicações móveis. Batizada pela UIT com o nome de IMT-2020, a telefonia móvel de quinta geração deve operar na faixa de ondas milimétricas, dentre outras, compartilhando espectro com o serviço de satélite fixo e com o de radioastronomia. Por isso, estudos de compartilhamento entre o IMT-2020 e esses serviços devem ser executados de forma a levantar o nível de interferência que o serviço entrante vai causar nos serviços existentes.

Além disso, uma das tecnologias que pode vir a fazer parte do IMT-2020 é o *full duplex*, que tem como potencial dobrar a capacidade de redes de comunicação ao custo de causar mais interferência intra e intersistemas. Permitindo que estações transmitam e recebam dados ao mesmo tempo na mesma frequência, o *full duplex* pode proporcionar uma melhor eficiência espectral e vazão de dados, mas gera mais interferência sistêmica devido ao maior número de transmissões simultâneas. Quando compartilhando espectro com outros sistemas, o IMT-2020 pode causar mais interferência quando opera em *full duplex* do quando utiliza técnicas tradicionais de duplexação no tempo ou na frequência, o *half duplex*.

Sendo assim, esse trabalho apresentou uma avaliação sistêmica da viabilidade do *full duplex*, junto com uma estimativa do impacto da interferência extra gerada, seguida por uma série de estudos de compartilhamento do IMT-2020 com o serviço de satélite fixo e a radioastronomia. O compartilhamento das faixas de 27-27,5 GHz com o enlace de subida do serviço de satélite fixo, 37-42,5 GHz com o enlace de descida do serviço de satélite fixo, e 42,5-43,5 GHz com o serviço de radioastronomia foi mostrado e as condições para compartilhamento de frequência em cada uma das faixas foi definida. Um resumo das conclusões inferidas dos resultados de simulação é apresentado na seção a seguir.

6.2 Inferências dos resultados

No Capítulo 4 foi mostrada uma avaliação do *full duplex* do ponto de vista de ganho de vazão de dados dentro da rede celular. Como discutido na literatura, topologias de células pequenas, seja *hotspot* ou *indoor*, se sobressaem nas faixas de ondas milimétricas e com o *full duplex*. Foi observado, também, que a utilização de MIMO massivo e conformação de feixe tem o potencial de aumentar significativamente o ganho do *full duplex*, o que, aliado ao menor tamanho de antenas nas frequências em estudo, justifica a confecção de painéis com dezenas ou até centenas de elementos irradiantes.

Com relação à comparação entre os tipos de *full duplex*, foi constatado que o *full duplex* de três nós é mais vantajoso do que o bidirecional, devido à dificuldade em se alcançar altos níveis de cancelamento de autointerferência nos terminais de usuário. Com antenas omnidirecionais, a interferência entre terminais de usuário pode chegar a reduzir em mais de 10% o ganho do *full duplex* de três nós na direção de descida, mas, se for utilizada a conformação de feixes prevista para o IMT-2020, o ganho do *full duplex* na descida se mantém próximo do valor teórico de 100%.

O desequilíbrio da carga da rede pode não impactar o ganho de vazão total do *full duplex*, mas o ganho de vazão dos enlaces individuais é sensível a desequilíbrios. Mais especificamente, a direção de descida se beneficia menos do *full duplex* à medida que mais dados são transmitidos pelas estações base. Inversamente, os terminais de usuário têm mais tempo para transmitir no *full duplex*, logo podem alcançar taxas maiores quando não têm que esperar o fim das transmissões na direção de descida para transmitir dados na de subida.

Nos estudos de convivência, apresentados no Capítulo 5, constatou-se que a estação espacial do serviço de satélite fixo estará livre de interferência do IMT-2020 na faixa de 27-27,5 GHz. Para a estação terrestre, distâncias de separação de 1000 m são mais do que o suficiente para proteger a estação da interferência causada pelas estações de telefonia celular. Mais do que isso, foi demonstrado que o *full duplex* pode reduzir a interferência medida na estação terrestre sem afetar a vazão de dados na descida e reduzindo a vazão de subida em 16%, devido a autointerferência nas estações base.

Para o terminal de usuário do serviço de satélite fixo, o compartilhamento de frequência com o IMT-2020 operando na topologia *hotspot* se mostra improvável. Ao se restringir para o cenário *indoor* o uso do IMT no mesmo canal do terminal de usuário, a interferência cai significativamente, reduzida pela perda por penetração nas paredes do prédio. Isso resulta na possibilidade de compartilhamento de frequência quando o terminal de usuário do serviço de satélite fixo está localizado no topo do prédio em que se encontra. Quando ele está na lateral do prédio, no entanto, restrições adicionais devem ser empregadas para que haja compartilhamento. Para o serviço de radioastronomia, uma zona de exclusão de 54 km se mostrou suficiente para proteger a estação do serviço passivo, sendo que 52 km já se mostraram suficientes caso a rede IMT opere somente em *half duplex*.

De um ponto de vista regulatório, a faixa de 27-27,5 GHz poderia ser alocada ao IMT-2020 sem que haja prejuízo para o serviço de satélite fixo. Já a faixa de 37-42,5 GHz poderia ser

dividida em duas subfaixas, uma na qual o IMT pode operar sem restrições, a não ser a distância de separação da estação terrestre, e outra na qual o IMT pode operar somente dentro de prédios, a ser compartilhada com o terminal de usuário do serviço de satélite fixo. Blindagem ou redução de potência de transmissão das estações IMT pode ser utilizada em casos em que há dificuldade de convivência. A faixa de 42.5-43.5 GHz poderia ser alocada ao IMT desde que haja a criação de zonas de exclusão grandes o suficiente ao redor das estações de radioastronomia, nas quais o IMT não pode utilizar a faixa. Essas são, no entanto, sugestões de alocação baseadas somente nos resultados aqui apresentados. Para avaliações mais completas, outros estudos, que seguem diferentes premissas e metodologias, devem ser analisados.

Os resultados mostrados aqui, embora seguindo topologias e modelagens teóricas, demonstram a possibilidade de compartilhamento de frequência, dadas as restrições pertinentes. No entanto, a coordenação de casos reais deve se dar caso a caso, uma vez que as particularidades de todos os possíveis cenários de convivência não podem ser avaliadas em um ambiente de simulação. Ainda assim, esses resultados são úteis para a elaboração de regulamentações, já que demonstram a existência de cenários realistas nos quais pode ser realizado o compartilhamento de espectro.

6.3 Avaliação perante os objetivos

A revisão da literatura apresentada no Capítulo 2, seguida pela descrição do simulador desenvolvido, feita no Capítulo 3, representam os objetivos específicos 1 e 2, respectivamente. As simulações do Capítulo 4 são pertinentes ao objetivo específico número 3, e apresentam uma avaliação do desempenho do *full duplex* em múltiplos cenários. Por fim, o objetivo específico 4 foi abordado no Capítulo 5.

Além disso, a questão problema do trabalho, definida como:

Em que condições o compartilhamento de frequência entre redes de telefonia móvel de quinta geração e os serviços de satélite fixo e radioastronomia é possível?

também foi respondida pelos resultados do Capítulo 5. Nele, foi executado o objetivo geral de se:

Levantar o nível de interferência que redes IMT-2020 causarão em sistemas satelitais e de radioastronomia em diversos possíveis cenários e compará-lo com os critérios de proteção definidos para esses sistemas.

com a conclusão de que, dadas as restrições estabelecidas, as redes de telefonia móvel 5G não irão causar interferência danosa aos sistemas de satélite fixo e radioastronomia e a convivência será possível. Dessa forma, o trabalho alcançou todos os objetivos propostos e respondeu à questão problema.

6.4 Contribuição do trabalho

Neste trabalho foram apresentados estudos de compartilhamento de frequência entre redes celulares de quinta geração operando em *full duplex* e sistemas de satélite fixo e radioastronomia. Dentro do conhecimento do autor, estudos desse tipo não estão presentes na literatura. Ademais, poucos trabalhos avaliam o ganho sistêmico do *full duplex* em ondas milimétricas, e este trabalho serve como uma contribuição no sentido de aprofundar a discussão da viabilidade dessa tecnologia em frequências mais altas. Além disso, este projeto produziu os artigos das referências [19] e [99].

Vários dos resultados apresentados aqui foram submetidos à UIT, e fazem parte dos textos preparatórios para a Conferência Mundial de Rádio 2019. Junto com centenas de outros estudos, eles serão utilizados como base para se criar regulamentações de validade global, e ajudarão agências regulatórias do mundo todo a tomar decisões técnicas específicas para a realidade de cada país. No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações vem se baseando nesses, e em outros estudos, para definir a alocações de frequência para o IMT-2020.

6.5 Trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem gerar novas contribuições, a partir do que foi feito nesse trabalho, explorando:

- Algoritmos de alocação de recursos para o *full duplex*: o gerenciamento adequado de recursos de frequência e tempo pode aumentar o ganho do *full duplex*. Aqui não foram analisados esquemas de alocação próprios para esse tipo de duplexação, havendo distribuição aleatória de recursos. Outros trabalhos podem mostrar como melhores esquemas de alocação obtêm ganhos de vazão de dados maiores;
- Estudos de convivência com outros sistemas: outros sistemas devem compartilhar faixas de frequência de ondas milimétricas com o IMT-2020, como plataformas de alta altitude, serviços fixos e de radionavegação. Estudos sobre como o *full duplex* impacta a interferência nesses sistemas podem ser realizados com o simulador desenvolvido neste trabalho, o FD-SHARC;
- Análise com simuladores dinâmicos: o simulador utilizado aqui é estático, e tem um bom desempenho na avaliação de interferência. Com simuladores dinâmicos as análises podem se tornar ainda mais aprofundadas, levando em consideração perfis de tráfego e algoritmos de gerenciamento de recursos de rádio;
- Algoritmos cooperativos: o *full duplex* pode ser avaliado não com o objetivo de aumentar a vazão, mas com o objetivo de reduzir a interferência em sistemas existentes. Nesse caso, algoritmos de gerenciamento de recursos cooperativos podem levar em consideração a existência de outros sistemas na hora de distribuir os recursos de rádio dentro das redes IMT;
- IMT em comunicações entre máquinas ou ultraconfiáveis: aqui somente foi avaliado o fornecimento de banda larga móvel em comunicações de quinta geração. Outros casos de uso, como

comunicação massiva entre máquinas ou comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência podem ser explorados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz*. [S.l.], jul. 2003. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.452-11-200304-S!!PDF-E.pdf>.
- [2] CISCO Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021 White Paper. Mar 2017. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>.
- [3] CISCO Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016-2021 White Paper. Mar 2017. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>.
- [4] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *IMT traffic estimates for the years 2020 to 2030*. [S.l.], jul. 2015. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf>.
- [5] CISCO Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022. Nov 2018. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>>.
- [6] SHE, C.; YANG, C.; QUEK, T. Q. S. Radio resource management for ultra-reliable and low-latency communications. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 6, p. 72–78, June 2017. ISSN 0163-6804.
- [7] DAWY, Z. et al. Toward massive machine type cellular communications. *IEEE Wireless Communications*, v. 24, n. 1, p. 120–128, February 2017. ISSN 1536-1284.
- [8] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Naming for International Mobile Telecommunications*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.itu.int/pub/R-RES-R.56>>.
- [9] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Report ITU-R M.2410-0 - Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*. [S.l.], fev. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en>>.

- [10] PI, Z.; KHAN, F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Communications Magazine*, v. 49, n. 6, p. 101–107, June 2011. ISSN 0163-6804.
- [11] RAPPAPORT, T. S. et al. Millimeter wave mobile communications for 5g cellular: It will work! *IEEE Access*, v. 1, p. 335–349, 2013.
- [12] RANGAN, S.; RAPPAPORT, T. S.; ERKIP, E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 3, p. 366–385, March 2014. ISSN 0018-9219.
- [13] MARCUS, M. J. Spectrum policy issues for millimeter wave mobile communications [spectrum policy and regulatory issues]. *IEEE Wireless Communications*, v. 21, n. 6, p. 8–9, December 2014. ISSN 1536-1284.
- [14] GUO, P. .; CHUANG, H. . A 60-ghz millimeter-wave cmos rfc-on-chip meander-line planar inverted-f antenna for wpan applications. In: *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–4. ISSN 1522-3965.
- [15] CHEN, J. et al. Design of silicon based millimeter wave oscillators. In: *2016 IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. [S.l.: s.n.], 2016. v. 1, p. 261–263.
- [16] HONG, W. et al. Cmos millimeter wave and thz ics. In: *2011 China-Japan Joint Microwave Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–1. ISSN 2165-4727.
- [17] RAPPAPORT, T. S. et al. 38 ghz and 60 ghz angle-dependent propagation for cellular amp; peer-to-peer wireless communications. In: *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 4568–4573. ISSN 1938-1883.
- [18] ALHALABI, R. A.; REBEIZ, G. M. High-efficiency angled-dipole antennas for millimeter-wave phased array applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, v. 56, n. 10, p. 3136–3142, Oct 2008. ISSN 0018-926X.
- [19] SOUZA, E. et al. An open source simulation tool for sharing and compatibility studies between 5G and other radiocommunication systems. In: *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- [20] International Telecommunication Union. *Radio Regulations*. 2016.
- [21] WORLD Radiocommunication Conferences (WRC). 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/Pages/default.aspx>>.
- [22] STUDY Group 5 (SG5). 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/Pages/default.aspx>>.
- [23] CONFERENCE Preparatory Meeting (CPM). 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rcpm/Pages/cpm-19.aspx>>.

- [24] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Resolution 238: Studies of frequency-related matters for International Mobile Telecommunications identification including possible additional allocations to the mobile services on a primary basis in portion(s) of the frequency range between 24.25 and 86 GHz for the future development of International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond*. [S.l.], 2015.
- [25] TASK Group 5/1 (TG 5/1). 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/tg5-1/pages/default.aspx>>.
- [26] WORKING Party 5D (WP 5D) - IMT Systems. 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/Pages/default.aspx>>.
- [27] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies*. [S.l.], fev. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2101/>>.
- [28] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Handbook on Radio Astronomy*. [S.l.], 2013. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-22-2013-PDF-E.pdf>.
- [29] SHARC Simulator. <https://github.com/SIMULATOR-WG/SHARC>.
- [30] GOYAL, S. et al. Full duplex cellular systems: will doubling interference prevent doubling capacity? *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 5, p. 121–127, May 2015. ISSN 0163-6804.
- [31] XIAO, Z.; XIA, P.; XIA, X. Full-duplex millimeter-wave communication. *IEEE Wireless Communications*, v. 24, n. 6, p. 136–143, Dec 2017. ISSN 1536-1284.
- [32] FD-SHARC Simulator. <https://github.com/MWSL-UnB/FD-SHARC>.
- [33] TECHNICAL SPECIFICATION GROUP RADIO ACCESS NETWORK, 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). *3GPP TR 21.915 V1.0.0: Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15)*. [S.l.], mar. 2019.
- [34] SHAFI, M. et al. 5g: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 6, p. 1201–1221, June 2017. ISSN 0733-8716.
- [35] ZHANG, S. et al. Fundamental green tradeoffs: Progresses, challenges, and impacts on 5g networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 1, p. 33–56, Firstquarter 2017. ISSN 1553-877X.
- [36] LIU, G. et al. 5g features from operation perspective and fundamental performance validation by field trial. *China Communications*, v. 15, n. 11, p. 33–50, Nov 2018. ISSN 1673-5447.
- [37] OKUYAMA, T. et al. 5g experimental trials of 4.5 ghz band digital beamforming in dense urban area. In: *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1130–1131. ISSN 2166-9589.

- [38] APOSTOLIDIS, A. et al. *Intermediate description of the spectrum needs and usage principles*. [S.l.], Aug 2013.
- [39] RAPPAPORT, T. S.; MURDOCK, J. N.; GUTIERREZ, F. State of the art in 60-ghz integrated circuits and systems for wireless communications. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 8, p. 1390–1436, Aug 2011. ISSN 0018-9219.
- [40] QINGLING, Z.; LI, J. Rain attenuation in millimeter wave ranges. In: *2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation EM Theory*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–4.
- [41] RUSEK, F. et al. Scaling up mimo: Opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 30, n. 1, p. 40–60, Jan 2013. ISSN 1053-5888.
- [42] CHUNG, H. et al. From architecture to field trial: A millimeter wave based mhn system for hst communications toward 5g. In: *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- [43] INOUE, Y. et al. Field experimental trials for 5g mobile communication system using 70 ghz-band. In: *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- [44] SANCHIS-BORRÁS, C. et al. Experimental study of mimo-ofdm transmissions at 94 ghz in indoor environments. *IEEE Access*, v. 5, p. 7488–7494, 2017. ISSN 2169-3536.
- [45] ROVEDA, G.; COSTA, M. Flexible use of d band spectrum for 5g transport: a research field trial as input to standardization. In: *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 800–804. ISSN 2166-9589.
- [46] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. [S.l.], set. 2015. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083>>.
- [47] ZHENG, L.; TSE, D. N. C. Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 49, n. 5, p. 1073–1096, May 2003. ISSN 0018-9448.
- [48] MARZETTA, T. L.; HOCHWALD, B. M. Capacity of a mobile multiple-antenna communication link in rayleigh flat fading. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 45, n. 1, p. 139–157, Jan 1999. ISSN 0018-9448.
- [49] SARRET, M. G. et al. Can full duplex boost throughput and delay of 5g ultra-dense small cell networks? In: *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.
- [50] ZHANG, Z. et al. Full duplex techniques for 5g networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 5, p. 128–137, May 2015. ISSN 0163-6804.

- [51] THILINA, K. M. et al. Medium access control design for full duplex wireless systems: challenges and approaches. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 5, p. 112–120, May 2015. ISSN 0163-6804.
- [52] WANG, L. et al. Exploiting full duplex for device-to-device communications in heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 5, p. 146–152, May 2015. ISSN 0163-6804.
- [53] WEN, D. et al. Results on energy- and spectral-efficiency tradeoff in cellular networks with full-duplex enabled base stations. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 16, n. 3, p. 1494–1507, March 2017. ISSN 1536-1276.
- [54] CHEN, S. et al. Probabilistic medium access control for full-duplex networks with half-duplex clients. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 16, n. 4, p. 2627–2640, April 2017. ISSN 1536-1276.
- [55] LI, R. et al. Full-duplex cellular networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 4, p. 184–191, April 2017. ISSN 0163-6804.
- [56] DUARTE, M.; SABHARWAL, A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results. In: *2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1558–1562. ISSN 1058-6393.
- [57] RADUNOVIC, B. et al. Rethinking indoor wireless mesh design: Low power, low frequency, full-duplex. In: *2010 Fifth IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.
- [58] SARRET, M. G. et al. On the potential of full duplex performance in 5G ultra-dense small cell networks. p. 764–768, Aug 2016.
- [59] HEINO, M. et al. Recent advances in antenna design and interference cancellation algorithms for in-band full duplex relays. *IEEE Communications Magazine*, v. 53, n. 5, p. 91–101, May 2015. ISSN 0163-6804.
- [60] KNOX, M. E. Single antenna full duplex communications using a common carrier. In: *WAMICON 2012 IEEE Wireless Microwave Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–6.
- [61] JAIN, M. et al. Practical, real-time, full duplex wireless. In: *17th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 301–312.
- [62] DUARTE, M. et al. Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for wifi networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 63, n. 3, p. 1160–1177, March 2014. ISSN 0018-9545.
- [63] BHARADIA, D.; MCMILIN, E.; KATTI, S. Full duplex radios. In: *ACM SIGCOMM*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 375–396.
- [64] HE, Y.; YIN, X.; CHEN, H. Spatiotemporal characterization of self-interference channels for 60-ghz full-duplex communication. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 16, p. 2220–2223, 2017. ISSN 1536-1225.

- [65] DINC, T.; CHAKRABARTI, A.; KRISHNASWAMY, H. A 60 ghz cmos full-duplex transceiver and link with polarization-based antenna and rf cancellation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 51, n. 5, p. 1125–1140, May 2016. ISSN 0018-9200.
- [66] DINC, T.; KRISHNASWAMY, H. Millimeter-wave full-duplex wireless: Applications, antenna interfaces and systems. In: *2017 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–8. ISSN 2152-3630.
- [67] TONG, Z.; HAENGGI, M. Throughput analysis for full-duplex wireless networks with imperfect self-interference cancellation. *IEEE Transactions on Communications*, v. 63, n. 11, p. 4490–4500, Nov 2015. ISSN 0090-6778.
- [68] SIM, M. S. et al. Nonlinear self-interference cancellation for full-duplex radios: From link-level and system-level performance perspectives. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 9, p. 158–167, Sep. 2017. ISSN 0163-6804.
- [69] XIE, X.; ZHANG, X. Does full-duplex double the capacity of wireless networks? p. 253–261, April 2014. ISSN 0743-166X.
- [70] XIAO, Z.; XIA, P.; XIA, X. Full-duplex millimeter-wave communication. *IEEE Wireless Communications*, v. 24, n. 6, p. 136–143, Dec 2017. ISSN 1536-1284.
- [71] TANG, A.; WANG, X. A-duplex: Medium access control for efficient coexistence between full-duplex and half-duplex communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 14, n. 10, p. 5871–5885, Oct 2015. ISSN 1536-1276.
- [72] AFIFI, W. et al. Full-duplex or half-duplex: A bayesian game for wireless networks with heterogeneous self-interference cancellation capabilities. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 17, n. 5, p. 1076–1089, May 2018. ISSN 1536-1233.
- [73] TAN, L. T.; LE, L. B. Design and optimal configuration of full-duplex mac protocol for cognitive radio networks considering self-interference. *IEEE Access*, v. 3, p. 2715–2729, 2015. ISSN 2169-3536.
- [74] CAO, X. et al. Full-duplex mac protocol for wi-fi/lte-u coexistence networks. In: *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2474-9133.
- [75] KIM, S. et al. Coexistence of 5G with the incumbents in the 28 and 70 ghz bands. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 6, p. 1254–1268, June 2017. ISSN 0733-8716.
- [76] WANG, T. et al. Coexistence interference analysis of 28 ghz imt and fixed-satellite service systems. In: *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1574–1578.
- [77] CHO, Y. et al. Spectral coexistence of imt-2020 with fixed-satellite service in the 27-27.5 ghz band. In: *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2162-1233.

- [78] GUIDOLIN, F.; NEKOVEE, M. Investigating spectrum sharing between 5g millimeter wave networks and fixed satellite systems. In: *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–7.
- [79] GUIDOLIN, F. et al. A cooperative scheduling algorithm for the coexistence of fixed satellite services and 5g cellular network. In: *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1322–1327. ISSN 1550-3607.
- [80] KIM, S. et al. Coexistence of 5g with the incumbents in the 28 and 70 ghz bands. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 35, n. 6, p. 1254–1268, June 2017. ISSN 0733-8716.
- [81] GERGELY, T. E. Spectrum access for the passive services: The past and the future. *Proceedings of the IEEE*, v. 102, n. 3, p. 393–398, March 2014. ISSN 0018-9219.
- [82] RAMADAN, Y. R.; MINN, H.; DAI, Y. A new paradigm for spectrum sharing between cellular wireless communications and radio astronomy systems. *IEEE Transactions on Communications*, v. 65, n. 9, p. 3985–3999, Sep. 2017. ISSN 0090-6778.
- [83] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Annex 1 to Task Group 5/1 Chairman’s Report: System Parameters and Propagation Models to be used in Sharing and Compatibility Studies*. [S.l.], maio 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0092/en>>.
- [84] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Characteristics of Terrestrial IMT Systems for Frequency Sharing/Interference Analyses in the Frequency Range Between 24.25 GHz and 86 GHz*. [S.l.], fev. 2017.
- [85] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas in point-to-multipoint systems for use in sharing studies in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz*. [S.l.], mar. 2012. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1336>>.
- [86] TECHNICAL SPECIFICATION GROUP RADIO ACCESS NETWORK, 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP). *3GPP TR 38.900 V14.2.0: Study on channel model for frequency spectrum above 6GHz*. [S.l.], Fev 2016.
- [87] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Prediction of clutter loss*. [S.l.], jun. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2108-0-201706-I!!PDF-E.pdf>.
- [88] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz*. [S.l.], jun. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-9-201706-I!!PDF-E.pdf>.
- [89] GOYAL, S. et al. Full duplex operation for small cells. *CoRR*, abs/1412.8708, 2014. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1412.8708>>.

- [90] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Prediction of building entry loss*. [S.l.], jun. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2109-0-201706-I!!PDF-E.pdf>.
- [91] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Satellite antenna radiation pattern for use as a design objective in the fixed-satellite service employing geostationary satellites*. [S.l.], 1997. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.672-4-199709-I!!PDF-E.pdf>.
- [92] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Propagation data required for the evaluation of interference between stations in space and those on the surface of the Earth*. [S.l.], jun. 2017. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.619-2-201706-I/en>>.
- [93] RICHHARIA, M. *Satellite Communication Systems: Design Principles*. [S.l.]: Macmillan Education UK, 1999. ISBN 978-0-333-74722-3, 978-1-349-14964-3.
- [94] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *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*. [S.l.], 2010. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.465-6-201001-I!!PDF-E.pdf>.
- [95] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Radiation diagrams for use as design objectives for antennas of earth stations operating with geostationary satellites*. [S.l.], Jan 2004. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.580-6-200401-I!!PDF-E.pdf>.
- [96] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Prediction by diffraction*. [S.l.], jan. 2018. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-14-201801-I!!PDF-E.pdf>.
- [97] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (ITU). *Protection criteria used for radio astronomical measurements*. [S.l.], Abr 2004. Disponível em: <https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/ra/R-REC-RA.769-2-200305-I!!PDF-E.pdf>.
- [98] Keating, R.; Ratasuk, R.; Ghosh, A. Performance analysis of full duplex in cellular systems. In: *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.
- [99] QUEIROZ, C. et al. New spectrum bands for haps: Sharing with fixed-satellite systems. In: *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC)*. [S.l.: s.n.], 2019.

ANEXOS

I. COTRIBUIÇÕES DO AUTOR PARA O SIMULADOR SHARC

As contribuições do autor deste trabalho para o simulador SHARC incluem:

- Implementação da conformação de feixe: codificação da conformação de feixe de acordo com as recomendações técnicas;
- Implementação da normalização dos diagramas de irradiação: normalização tanto da conformação de feixe como das antenas diretivas descritas neste trabalho;
- Codificação do sistema de radioastronomia;
- Implementação do cálculo de *wrap around* em redes IMT-2020;
- Modelagem e implementação do terminal de usuário do serviço de satélite fixo: modelagem dos parâmetros e metodologia de simulação;
- Modelagem e implementação do *full duplex* bidirecional: toda lógica de simulação do *full duplex*, incluindo algoritmos de cálculo de perda de acoplamento e cálculo de interferência, distribuição de carga entre *downlink* e *uplink* e cancelamento de autointerferência;
- Modelagem e implementação do *full duplex* não bidirecional: (os mesmos pontos do item anterior);
- Modelagem e implementação dos modelos de propagação entre estações base e entre terminais de usuário: modelos de propagação utilizados nas simulações do *full duplex*;
- Implementação do modelo de propagação ITU-R P.1411: modelo genérico utilizado em vários cenários deste trabalho;
- Implementação dos modelos de propagação do serviço de satélite fixo de alta densidade: incluindo perda por difração, penetração em prédios e ITU-R P.1411;
- Aprimoramento da topologia *indoor*;
- Aprimoramento da topologia macrocelular: adaptação da implementação existente para o *full duplex*;
- Implementação do cálculo da área de cobertura das estações satelitais: área de cobertura em função do ângulo de elevação implementada com base na literatura;
- Implementação da análise de interferência em canal adjacente: algoritmos de cálculo de interferência em caso de sistemas operando em bandas adjacentes;
- Implementação das máscaras espectrais do sistema IMT-2020;

- Modelagem e implementação de estudos de convivência com o serviço de plataformas de alta altitude: auxílio na modelagem e implementação da topologia e cálculo de interferência agregada no serviço de satélite fixo;
- Modelagem e implementação de estudos de convivência entre sistemas de plataforma de alta altitude e radioastronomia;
- Implementação de diagramas de irradiação dos sistemas de plataformas de alta altitude;
- Análise e validação de resultados de simulação: comparação com estudos de outras fontes, calibração do simulador e ajuste de erros de codificação em geral;
- Escrita e submissão de contribuições para reuniões regulatórias: apresentação e elaboração de estudos para reuniões nacionais e internacionais.

II. WRAP AROUND

Para se analisar o comportamento de redes celulares sem introduzir erros devido a condições de borda, é necessário se considerar uma rede infinita. Uma forma de se alcançar isso é através de técnicas de *wrap around*, nas quais a rede original simulada é posicionada em uma superfície toroidal. A técnica de *wrap around* mostrada aqui é baseada no anexo 1 da recomendação ITU-R M.2101 [27]. Para ilustrar a natureza do *wrap around*, uma rede com 19 estações base na topologia macrocelular, mostrada na Figura II.1(a), é repetida seis vezes, como mostra a Figura II.1(b). A rede original permanece no centro enquanto as seis repetições da rede envolvem essa topologia central. Dessa forma, ao se calcular a perda de acoplamento entre duas estações do sistema IMT-2020 uma das estações é tratada como se estivesse em todas as sete cópias da rede.

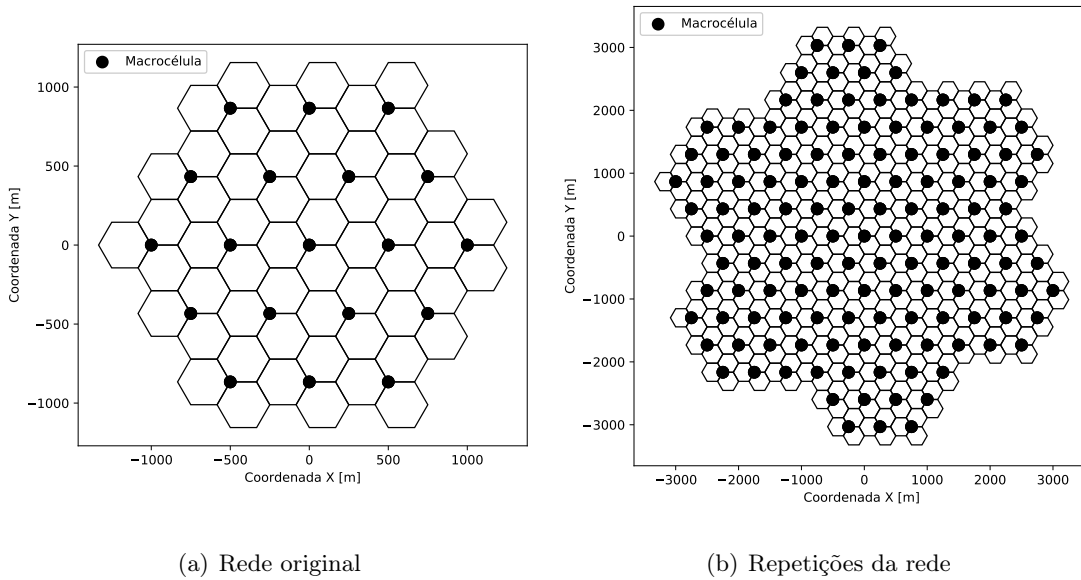


Figura II.1: Rede a) original e b) depois das repetições do algoritmo de *wrap around*.

O algoritmo é realizado da seguinte maneira:

1. Definir um sistema de coordenadas de forma que o sítio central da rede original encontra-se na origem;
2. Dadas duas estações, cujas coordenadas na rede original são (x, y) e (a, b) , são computadas as distâncias e ângulos (azimutal e de elevação) entre os pontos:
 - (a) (x, y) e (a, b) ;
 - (b) (x, y) e $(a + 3,5 \cdot D, b + 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot D)$;
 - (c) (x, y) e $(a - 0,5 \cdot D, b + 2,5 \cdot \sqrt{3} \cdot D)$;
 - (d) (x, y) e $(a - 4 \cdot D, b + \sqrt{3} \cdot D)$;

(e) (x, y) e $(a - 3,5 \cdot D, b - 1,5 \cdot \sqrt{3} \cdot D)$;

(f) (x, y) e $(a + 0,5 \cdot D, b - 2,5 \cdot \sqrt{3} \cdot D)$;

(g) (x, y) e $(a + 4 \cdot D, b - \sqrt{3} \cdot D)$;

onde D é a distância entre sítios da rede original;

3. Das distâncias acima, é escolhida a de menor valor, bem como os ângulos associados a ela, para se computar a perda de propagação e ganho das antenas das estações;
4. A perda de propagação e ganho de antenas são utilizados no cálculo da perda de acoplamento entre as estações.

Vale ressaltar que esse algoritmo de *wrap around* é utilizado somente para se computar a perda de acoplamento entre estações do sistema IMT. No caso da perda entre estações de sistemas distintos, a perda de acoplamento considera somente as coordenadas (x, y) e (a, b) das estações, sem haver repetição da rede original, como na rede da Figura II.1(a).

III. ÁREA DE COBERTURA DA ESTAÇÃO ESPACIAL

O método descrito à seguir calcula o contorno e a área de cobertura de satélites geoestacionários na superfície da Terra. O centro da área de cobertura, localizado no ponto onde o eixo principal do diagrama de irradiação da antena do satélite encontra a superfície terrestre, e a largura do feixe em questão, em geral a largura de meia potência ou de 100% de eficiência, são informações necessárias para esse cálculo. No caso de antenas de feixes elípticos, os ângulos de abertura nas direções vertical e horizontal são necessários, bem como a orientação da antena. O contorno de cobertura na Terra é obtido através do cálculo da latitude e longitude de n pontos na periferia da cobertura.

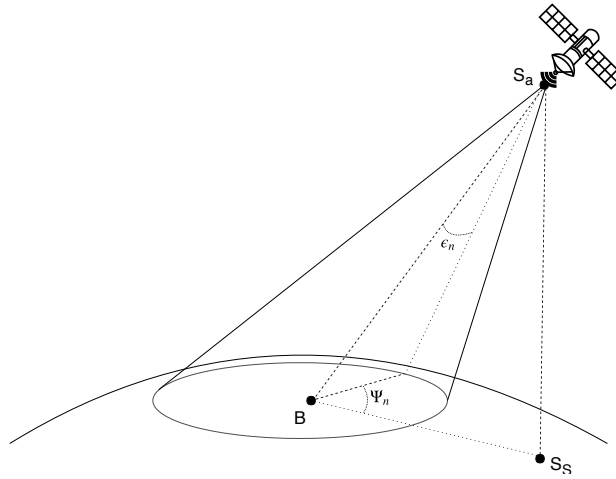


Figura III.1: Geometria do contorno da área de cobertura do satélite.

Inicialmente, definem-se os ângulos:

ϵ_n : largura de feixe angular na direção do n -ésimo ponto no contorno de cobertura. Para um feixe circular, ϵ_n é uma constante;

ψ_n : ângulo de rotação, rotação com referência no plano contendo o ponto subsatélite, o centro da área de cobertura e o n -ésimo ponto no contorno de cobertura.

A Figura III.1 mostra esses ângulos, bem como os pontos de centro da área de cobertura (B), subsatélite (S_S) e centro da antena (S_a). Em seguida, dada uma elevação θ_e , a longitude relativa entre os pontos B e S_S , ϕ_{SB} , é dada por:

$$\phi_{SB} = \pi/2 - \theta_e - \arcsen(\cos(\theta_e)/6,6235) \quad (\text{III.1})$$

O ângulo ϕ_{SB} , junto com a latitude do ponto B , θ_B , pode ser utilizado para se computar os seguintes ângulos:

$$\beta_B = \arccos(\cos(\theta_B)\cos(\phi_{SB})) \quad (\text{III.2a})$$

$$\gamma_B = \arctan(\text{sen}(\beta_B)/(6,6235 - \cos(\beta_B))) \quad (\text{III.2b})$$

onde β_B é o arco da superfície terrestre entre os pontos S_S e B e γ_B é o ângulo $B\hat{S}_a S_S$. Definindo como T_n o ponto formado pelo ângulo Ψ_n no contorno da área de cobertura, são definidos γ_n como o ângulo $T_n\hat{S}_a S$ e ϕ_n como $T_n\hat{S}B$. Esses ângulos são dados por:

$$\cos(\gamma_n) = \cos(\gamma_B)\cos(\epsilon_n) + \text{sen}(\gamma_B)\text{sen}(\epsilon_n)\cos(\psi_n) \quad (\text{III.3a})$$

$$\cotan(\phi_n) = (\text{sen}(\gamma_B)\cotan(\epsilon_n) - \cos(\gamma_B)\cos(\psi_n))/\text{sen}(\psi_n) \quad (\text{III.3b})$$

O próximo passo é calcular os ângulos de azimute do ponto T_n (ζ_n) e o arco da superfície terrestre entre os pontos S_S e T_n (β_n), dados por:

$$\zeta_n = \arctan(\text{sen}(\phi_{SB})/\tan(\theta_B)) + \phi_n \quad (\text{III.4a})$$

$$\beta_n = \arcsen(6,6235\text{sen}(\gamma_n)) - \gamma_n \quad (\text{III.4b})$$

Por fim, a longitude com relação ao ponto S_s do ponto T_n , ϕ_{S_n} , e a latitude desse ponto são calculados por meio de:

$$\phi_{S_n} = \arctan(\tan(\beta_n)\text{sen}(\zeta_n)) \quad (\text{III.5a})$$

$$\theta_n = \arcsen(\text{sen}(\beta_n)\cos(\zeta_n)) \quad (\text{III.5b})$$

Quando o feixe é elíptico, ϵ_n depende do valor de ψ_n da seguinte maneira:

$$\cotan^2(\epsilon_n) = \cotan^2(\epsilon_1)\cos^2(\alpha_r + \psi_n) + \cotan^2(\epsilon_2)\text{sen}^2(\alpha + \psi_n) \quad (\text{III.6})$$

onde ϵ_1 e ϵ_2 são os ângulos de abertura da antena e α_r é a rotação de ϵ_1 na direção do azimute do ponto B .

Dadas as equações acima, ψ_n pode ser variado de 0 a 2π radianos de forma a se obter tantos pontos no contorno da área de cobertura quantos forem necessários. A Figura III.2 mostra o contorno da área de cobertura do satélite para diversas elevações. É interessante notar que a própria curvatura da terra limita o contorno para elevações muito pequenas, como é o caso da elevação de 5° mostrada na Figura III.2.

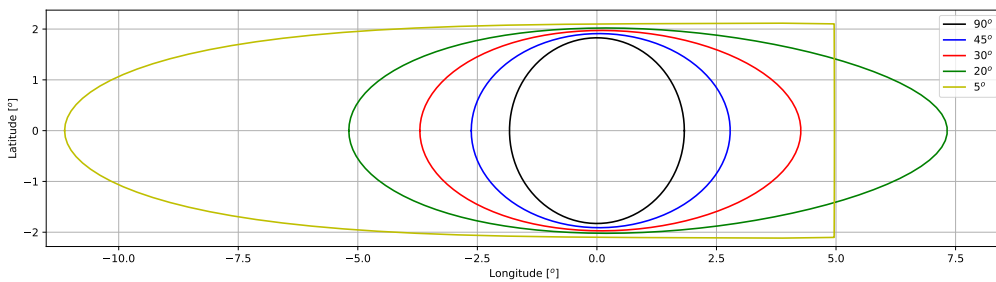


Figura III.2: Contorno da área de cobertura do satélite para diversas elevações.

Com os pontos que definem o contorno da área de cobertura em mãos, é possível calcular o valor dessa área. Dados três pontos consecutivos T_{n-1} , T_n e T_{n+1} , considerando que os pontos estão suficientemente próximos, a área do triângulo $T_{n-1}\hat{B}T_{n+1}$ pode ser aproximada por:

$$A_{\Delta n} = (\phi_{S_{n+1}} - \phi_{S_{n-1}})\text{sen}(\theta_n)R^2/2 \quad (\text{III.7})$$

onde $A_{\Delta n}$ é a área do triângulo e R é o raio da Terra. Por fim, a área total de cobertura A_s é dada por:

$$A_s = \sum_{n=1}^N A_{\Delta n} \quad (\text{III.8})$$

sendo N a quantidade de pontos de contorno gerada. Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em [93].

IV. NORMALIZAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE IRRADIAÇÃO

O ganho total integrado dos modelos dos diagramas de irradiação mostrados nesse trabalho pode diferir de zero, o que significa que os modelos estão acrescentando ou retirando energia dos sinais transmitidos e recebidos. Para se evitar que isso resulte em um erro sistemático, é empregada a normalização dos diagramas de irradiação, seguindo o processo descrito a seguir.

O ganho total integrado do diagrama de irradiação $A_A(\theta, \varphi)$ é dado por:

$$G_T(A_A(\theta, \varphi)) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi A_A(\theta, \varphi) \text{sen}(\theta) d\theta d\varphi. \quad (\text{IV.1})$$

onde θ e φ são os ângulos de elevação e azimute no sistema de coordenadas da antena.

$$G_A(\varphi, \theta) = \frac{A_A(\varphi, \theta)}{G_T(A_A(\varphi, \theta))} \quad (\text{IV.2})$$

de forma que:

$$G_T(G_A(\varphi, \theta)) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi G_A(\varphi, \theta) \text{sen}(\theta) d\theta d\varphi = 1 = 0 \text{ dBi} \quad (\text{IV.3})$$

Para antenas isotrópicas o ganho total integrado é igual a um, o que significa que a normalização não altera o diagrama de irradiação dessas antenas. As antenas setorizadas utilizadas nesse trabalho, mostradas na Figura 3.7, têm ganho máximo de 15 dBi e abertura de meia potência de 65° , o que significa que o ganho total integrado delas é de 1,44 dBi. No caso de painéis de antenas, que utilizam conformação de feixes, o ganho total integrado pode chegar a valores abaixo de -10 dBi, a depender da orientação dos feixes, como mostra a Figura IV.1.

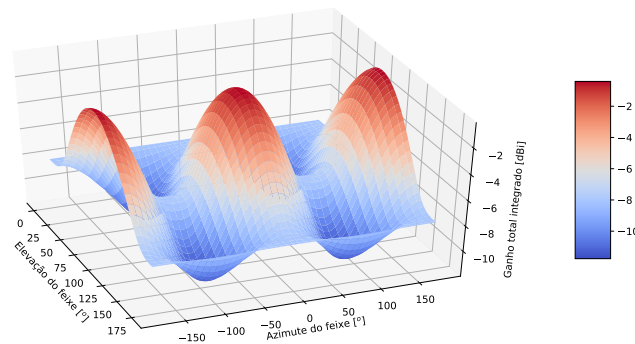


Figura IV.1: Ganho total integrado em função do apontamento dos feixes do painel de antenas 8x8 das estações base.

V. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Neste anexo são apresentados os parâmetros utilizados nas simulações dos Capítulos 4 e 5, a fim de possibilitar a replicação dos resultados por terceiros.

V.1 Parâmetros das simulações do Capítulo 4

As Tabelas V.1, V.2 e V.3 apresentam os parâmetros de simulação das três topologias avaliadas no Capítulo 4. A três tabelas são pertinentes à seção 4.2, enquanto as demais seções utilizam os parâmetros da Tabela V.2. Parâmetros variados nos resultados, como cancelamento de autointerferência (Seção 4.3) e desequilíbrio de carga (Seções 4.4 e 4.5) são explicitados nas suas respectivas seções. A Tabela V.4 mostra os parâmetros utilizados no modelo ITU-R P.452 [1], utilizado na propagação entre estações base na topologia macrocelular e entre a rede IMT e as estações terrestre do serviço de satélite fixo e da radioastronomia. Os valores atmosféricos são referentes à cidade de São Paulo, SP. Em todas as simulações do Capítulo 4 a rede IMT-2020 opera na faixa de 27-27,5 GHz.

Tabela V.1: Parâmetros da topologia macrocelular.

Parâmetro	BS	UE
Número de iterações	5000	
<i>Wrap around</i>	Habilitado	
Topologia		
Número de sítios	19	
Número de <i>clusters</i>	1	
Distância entre sítios	500 m	
Separação mínima entre BS e UE	10 m	
UEs ativas por BS	3	
UEs <i>indoor</i>	0%	
Distribuição de UEs	Uniforme	
Altura	25 m	3 m
Espectro		
Frequência central	27,25 GHz	
Largura de banda	200 MHz	
Largura de banda do bloco de recurso	180 kHz	
Banda de guarda	10% da banda total	
Carga		
Fator de carga	20%	
Radiofrequência		

Potência máxima de transmissão	28,06 dBm	22 dBm
Controle de potência	Não	Sim
P_{CMAX}	-	22 dBm
P_0_{PUSCH}	-	-95 dBm
α	-	1
Figura de ruído	10 dB	10 dB
Temperatura de ruído	290 K	290 K
Perdas ômicas	3 dB	3 dB
Perdas pelo corpo humano	-	4 dB
Propagação		
BSs para UEs	UMa [86]	
BSs para BSs	IMT-R P.452 [1]	
Parâmetros do modelo	Tabela V.4	
UEs para UEs	Espaço livre e IMT-R P.1411 [88] ⁽²⁾	
Painél de antenas		
Número de elementos	8x8	4x4
Ganho máximo do elemento	5 dBi	5 dBi
Espaçamento vertical entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Espaçamento horizontal entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Ângulo de 3 dB	65°	90°
Razão frente-costa	30 dB	25 dB
Antenas SISO		
Diagrama de irradiação	ITU-R F.1336 [85]	Isotrópica
Ganho máximo	15 dBi	0 dBi
Ângulo de 3 dB	65°	-

Tabela V.2: Parâmetros da topologia *hotspot*.

Parâmetro	BS	UE
Número de iterações	5000	
<i>Wrap around</i>	Habilitado	
Topologia		
Número de sítios da macrocélula	19	
Número de <i>clusters</i>	1	
Distância entre sítios	339 m	
<i>Hotspots</i> por macrocélula	1	
Raio dos <i>hotspots</i>	100 m	
Separação mínima entre BS e UE	0 m	
UEs ativas por BS	3	

UEs <i>indoor</i>	0%	
Distribuição de UEs	Por azimute e distância	
Distribuição em distância	Rayleigh (fator de escala 32 m)	
Distribuição em azimute	Normal (média 0°, desvio padrão 30°)	
Altura	6 m	1,5 m
Espectro		
Frequência central	27,25 GHz	
Largura de banda	200 MHz	
Largura de banda do bloco de recurso	180 kHz	
Banda de guarda	10% da banda total	
Carga		
Fator de carga	20%	
Radiofrequência		
Potência máxima de transmissão	28,06 dBm	22 dBm
Controle de potência	Não	Sim
P_{CMAX}	-	22 dBm
P_0_{PUSCH}	-	-95 dBm
α	-	1
Figura de ruído	10 dB	10 dB
Temperatura de ruído	290 K	290 K
Perdas ôhmicas	3 dB	3 dB
Perdas pelo corpo humano	-	4 dB
Propagação		
BSs para UEs	UMi [86]	
BSs para BSs	Espaço livre e IMT-R P.1411 [88] ⁽¹⁾	
UEs para UEs	Espaço livre e IMT-R P.1411 [88] ⁽¹⁾	
Painel de antenas		
Número de elementos	8x8	4x4
Ganho máximo do elemento	5 dBi	5 dBi
Espaçamento vertical entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Espaçamento horizontal entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Ângulo de 3 dB	65°	90°
Razão frente-costa	30 dB	25 dB
Antenas SISO		
Diagrama de irradiação	ITU-R F.1336 [85]	Isotrópica
Ganho máximo	15 dBi	0 dBi
Ângulo de 3 dB	65°	-

(1) Modelo descrito na Seção 3.2.2.3.

Tabela V.3: Parâmetros da topologia *indoor*.

Parâmetro	BS	UE
Número de iterações	5000	
<i>Wrap around</i>	Desabilitado ⁽¹⁾	
Topologia		
Configuração de prédios	2x9	
Largura das ruas	30 m	
BSs por andar	3	
Distância entre BSs	40 m	
Andares com estações IMT	1 (térreo)	
UEs ativas por BS	3	
UEs <i>indoor</i>	95%	
Distribuição de UEs	Uniforme	
Altura	3 m (montadas no teto)	1,5 m
Espectro		
Frequência central	27,25 GHz	
Largura de banda	200 MHz	
Largura de banda do bloco de recurso	180 kHz	
Banda de guarda	10% da banda total	
Carga		
Fator de carga	20%	
Radiofrequência		
Potência máxima de transmissão	23,06 dBm	22 dBm
Controle de potência	Não	Sim
P_{CMAX}	-	22 dBm
P_0_{PUSCH}	-	-95 dBm
α	-	1
Figura de ruído	10 dB	10 dB
Temperatura de ruído	290 K	290 K
Perdas ôhmicas	3 dB	3 dB
Perdas pelo corpo humano	-	4 dB
Propagação		
BSs para UEs	InH Office [86] ⁽²⁾	
BSs para BSs	InH Office [86] ⁽²⁾	
UEs para UEs	InH Office [86] ⁽²⁾	
Painel de antenas		
Número de elementos	8x8	4x4
Ganho máximo do elemento	5 dBi	5 dBi
Espaçamento vertical entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Espaçamento horizontal entre elementos	0,5 λ	0,5 λ

Ângulo de 3 dB	90°	90°
Razão frente-costa	25 dB	25 dB
Antenas SISO		
Diagrama de irradiação	Isotrópica	Isotrópica
Ganho máximo	0 dBi	0 dBi

(1) Interferência entre prédios não considerada.

(2) Modelo descrito na Seção 3.2.2.3.

Tabela V.4: Parâmetros do modelo ITU-R P.452 [1]

Parâmetro	Valor
Pressão atmosférica	935 hPa
Temperatura	300k
Refratividade da superfície do nível do mar	352,58
Refratividade de rádio média	43,127
Distância até a costa	70 km
Latitude do transmissor	-23,55028°
Latitude do receptor	-23.17889°
Perda por obstruções	ITU-R P.2108 [87]
Perda entre BSs co-sítio ⁽¹⁾⁽²⁾	60 dB

(1) Valor válido somente para a topologia Macrocelular.

(2) Calculado com base na perda de propagação em espaço livre para 1m em 27,25 GHz.

Os parâmetros de interface enlace-sistema do serviço IMT-2020 são mostrados na Tabela V.5. Esses parâmetros são utilizados em todos os cálculos de densidade espectral e vazão do sistema IMT realizados neste trabalho.

Tabela V.5: Parâmetros de interface enlace-sistema.

Parâmetro	<i>downlink</i>	<i>uplink</i>	Notas
β	0,6	0,4	Representa perdas de implementação
$SINR_{min}$ [dB]	-10	-10	Baseado no QPSK, taxa de 1/8 (DL) e 1/5 (UL)
$SINR_{max}$ [dB]	30	22	Baseado no 256QAM, taxa de 0,93 (DL) e 0,93 (UL)

V.2 Parâmetros das simulações do Capítulo 5

Nos estudos de compartilhamento com a estação espacial do serviço de satélite fixo na faixa de 27-27,5 GHz, o IMT-2020 utiliza os parâmetros da Tabela V.2, exceto pelo número de iterações. Para as simulações mostradas na Seção 5.2.1 foram utilizadas 1500 iterações de simulação, ao invés de 5000 como nos demais casos. Nas demais frequências, são utilizados os parâmetros das Tabelas

V.6 e V.7 para as topologias *hotspot* e *indoor*, respectivamente. Com isso, os parâmetros do sistema IMT em todos os cenários analisados são mostrados nas Tabelas V.1 a V.7, exceto pela Tabela V.4. As demais tabelas mostram os parâmetros da estação espacial, terrestre e terminal de usuário do serviço de satélite fixo, e estação de observação de radioastronomia, nessa ordem.

Tabela V.6: Parâmetros da topologia *hotspot* nas faixas 37-42,5 GHz e 42,5-43,5 GHz.

Parâmetro	BS	UE
Número de iterações	5000	
<i>Wrap around</i>	Habilitado	
Topologia		
Número de sítios da macrocélula	19	
Número de <i>clusters</i>	1	
Distância entre sítios	339 m	
<i>Hotspots</i> por macrocélula	1	
Raio dos <i>hotspots</i>	100 m	
Separação mínima entre BS e UE	0 m	
UEs ativas por BS	3	
UEs <i>indoor</i>	5%	
Distribuição de UEs	Por azimute e distância	
Distribuição em distância	Rayleigh (fator de escala 32 m)	
Distribuição em azimute	Normal (média 0°, desvio padrão 30°)	
Altura	6 m	1,5 m
Espectro		
Frequência central	40 GHz e 42 GHz	
Largura de banda	200 MHz	
Largura de banda do bloco de recurso	180 kHz	
Banda de guarda	10% da banda total	
Carga		
Fator de carga	50%	
Radiofrequência		
Potência máxima de transmissão	26,06 dBm	22 dBm
Controle de potência	Não	Sim
P_{CMAX}	-	22 dBm
P_{0_PUSCH}	-	-95 dBm
α	-	1
Figura de ruído	12 dB	12 dB
Temperatura de ruído	290 K	290 K
Perdas ôhmicas	3 dB	3 dB
Perdas pelo corpo humano	-	4 dB
Propagação		

BSs para UEs	UMi [86]	
BSs para BSs	Espaço livre e IMT-R P.1411 [88] ⁽¹⁾	
UEs para UEs	Espaço livre e IMT-R P.1411 [88] ⁽¹⁾	
Painel de antenas		
Número de elementos	8x16	4x4
Ganho máximo do elemento	5 dBi	5 dBi
Espaçamento vertical entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Espaçamento horizontal entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Ângulo de 3 dB	65°	90°
Razão frente-costa	30 dB	25 dB

(1) Modelo descrito na Seção 3.2.2.3.

Tabela V.7: Parâmetros da topologia *indoor* na faixa de 37-42,5 GHz.

Parâmetro	BS	UE
Número de iterações	5000	
<i>Wrap around</i>	Desabilitado ⁽¹⁾	
Topologia		
Configuração de prédios	7x5	
Prédios contendo estações IMT	9 (30 BSs/km ²)	
Largura das ruas	30 m	
BSs por andar	4	
Distância entre BSs	30 m	
Andares com estações IMT	1 (térreo)	
UEs ativas por BS	3	
UEs <i>indoor</i>	95%	
Distribuição de UEs	Uniforme	
Altura	3 m (montadas no teto)	1,5 m
Espectro		
Frequência central	40 GHz	
Largura de banda	200 MHz	
Largura de banda do bloco de recurso	180 kHz	
Banda de guarda	10% da banda total	
Carga		
Fator de carga	50%	
Radiofrequência		
Potência máxima de transmissão	23,06 dBm	22 dBm
Controle de potência	Não	Sim
P_{CMAX}	-	22 dBm

P_0_{PUSCH}	-	-95 dBm
α	-	1
Figura de ruído	12 dB	12 dB
Temperatura de ruído	290 K	290 K
Perdas ôhmicas	3 dB	3 dB
Perdas pelo corpo humano	-	4 dB
Propagação		
BSs para UEs	InH Office [86] ⁽²⁾	
BSs para BSs	InH Office [86] ⁽²⁾	
UEs para UEs	InH Office [86] ⁽²⁾	
Painel de antenas		
Número de elementos	8x16	4x4
Ganho máximo do elemento	5 dBi	5 dBi
Espaçamento vertical entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Espaçamento horizontal entre elementos	0,5 λ	0,5 λ
Ângulo de 3 dB	90°	90°
Razão frente-costa	25 dB	25 dB

(1) Interferência entre prédios não considerada.

(2) Modelo descrito na Seção 3.2.2.3.

Tabela V.8: Parâmetros da estação espacial do serviço de satélite fixo em 27-27,5 GHz

Parâmetro	Valor		
Frequência central	27,25 GHz		
Largura de banda	200 MHz		
Altitude	35.780km		
Temperatura de ruído	950 K		
Diagrama de irradiação	ITU-R S.672 [91]		
Ganho de pico	51 dBi		
Ganho do lóbulo lateral relativo ao ganho de pico	-20 dB		
Ângulo de 3 dB	0,65°		
Modelo de propagação	ITU-R P.619 [92]		
Estação	Verão		
Área de cobertura			
Elevação	90°	45°	20°
Área de cobertura [km ²]	130.097	305.428	486.286
Densidade de estações[BSs/km ²]	30 (urbano) e 10 (suburbano)		
R_a	7% (urbano) e 3% (suburbano)		

R_b	5%		
Visibilidade	0,65°		
Eficiência no ângulo de visibilidade	101%		
Distância entre sítios IMT [m]	33.608	41.815	64.976
Número de BSs total	15.612	24.167	58.354
Número de BSs simulado	399		
Fator de segmento	39	61	146

Tabela V.9: Parâmetros da estação terrestre do serviço de satélite fixo em 37-42,5 GHz

Parâmetro	Valor
Frequência central	40 GHz
Largura de banda	200 MHz
Temperatura de ruído	250 K
Altura	10 m
Diagrama de irradiação	ITU-R S.465 [94]
Elevação	45°
Ganho de pico	68 dBi
Diâmetro	6,8 m
Modelo de propagação	ITU-R P.452 [1]
Parâmetros de propagação	Tabela V.4

Tabela V.10: Parâmetros do terminal de usuário do serviço de satélite fixo em 37-42,5 GHz

Parâmetro	Valor
Frequência central	40 GHz
Largura de banda	180 MHz
Temperatura de ruído	400 K
Altura	10 m (IMT <i>outdoor</i>) 19 m (topo do prédio) 11,5 m (lateral do prédio)
Diagrama de irradiação	ITU-R S.580 [95]
Elevação	45°
Ganho de pico	47 dBi
Diâmetro	0,74 m
Modelo de propagação	Espaço livre e ITU-R P.1411 ⁽¹⁾

(1) Modelo descrito na Seção 3.3.3.2.

Tabela V.11: Parâmetros da estação de radioastronomia na faixa de 42,5-43,5 GHz

Parâmetro	Valor
Frequência central	43 GHz
Largura de banda	1 GHz
Temperatura de ruído	90 K
Altura	50 m
Diagrama de irradiação	Isotrópico
Ganho	0 dBi
Modelo de propagação	ITU-R P.452 [1]
Parâmetros de propagação	Tabela V.4
Área de exclusão	
Raio da zona de exclusão	40 km 44 km 48 km 50 km 52 km 54 km 56 km 60 km 64 km 68 km
Área do anel [km ²]	436,08 478,78 521,49 542,84 564,19 585,54 606,89 649,59 692,29 734,99
Densidade de estações	30 BSs/km ²
R_a	100%
R_b	100%
Número total de BSs	13083 14364 14363 15645 16285 1693 1692 17567 18207 19488
Número de BSs simuladas	57
Fator de segmento	230 252 275 286 297 309 320 342 365 387