

Análise da Coexistência do 5G NR com
Comunicações Terrestres e Satelitais

Luciano Camilo Alexandre

Abril/2020

Análise da Coexistência do 5G NR com Comunicações Terrestres e Satelitais

Luciano Camilo Alexandre

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

Santa Rita do Sapucaí

2020

Alexandre, Luciano Camilo

A381a

Análise da Coexistência do 5G NR com Comunicações Terrestres e Satelitais. / Luciano Camilo Alexandre. – Santa Rita do Sapucaí, 2020.

117p.

Orientador: Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior.

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

Ficha Catalográfica elaborada pelo Bibliotecário da Instituição

CRB6-2718 – Paulo Eduardo de Almeida

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 30/04/2020, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior

Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)

Prof. Dr. Carlos Nazareth Motta Marins

Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)

Dr. Agostinho Linhares de Souza Filho

Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)

Prof. Dr. Ramon Dornelas Soares

Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ)

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Câmara Brito

“Não há cientista que não seja digno de ser descrito como artista ou poeta.”

*Sir Robert Alexander Watson-Watt
Inventor do Radar*

*Ao meu pai Edir Camilo (in memoriam) e à
minha mãe Wilcia Alexandre que abdicaram
dos seus sonhos para a realização dos meus.*

Agradecimentos

À Deus, pelas maravilhas que proporciona em minha vida e por ter dado a benção de vir ao mundo nas mãos de pessoas tão especiais, meus pais.

Agradeço aos meus pais, Edir Camilo (*in memoriam*) e Wilcia Alexandre, que não pouparam esforços em conceder-me a melhor criação e educação que poderiam estar ao seu alcance. Vocês são meu exemplo de vida, meu alicerce e minha sustentação. Meu amor por vocês é eterno.

Ao meu amor, Carina Oliveira, pelo apoio, paciência e compreensão por todos os momentos que estive ausente, com o objetivo de concluir esta jornada. Te amo.

Um agradecimento especial ao meu amigo Eng. MSc. Carlos Augusto Rocha, pelos ensinamentos, confiança e orientações em momentos críticos de minha vida.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior, pessoa que admiro e me espelho. Obrigado pela dedicação, apoio e motivação a estar sempre comprometido com a qualidade e excelência. Suas valiosas orientações me proporcionaram oportunidades de aprendizado e forneceram as ferramentas certas para que eu possa manter a busca contínua por conhecimento e desenvolver meu futuro profissional.

Aos companheiros de pesquisa do Laboratório WOCA, que compartilharam comigo os inúmeros desafios, sempre com espírito colaborativo. Obrigado pelo apoio incondicional, ensinamentos, horas de dedicação e verdadeira amizade. Um agradecimento especial ao Ten. Eng. Lucas Veiga, que dedicou boa parte do seu tempo a este trabalho e esteve comigo durante todos os experimentos, seu apoio foi essencial. À Dra. Andreia Castro, responsável pela minha iniciação na escrita científica, obrigado pelo apoio na confecção de protótipos e dedicação do seu tempo para discussões sobre o trabalho. Ao Eng. MSc. Evandro Augusto, por contribuir efetivamente na reta final

deste trabalho com apoio, sugestões e principalmente motivação para superar os desafios enfrentados. Aos engenheiros Celso e Marco e aos mestres Eduardo Saia, Hugo Filgueiras e Luis Gustavo, pelo apoio nas disciplinas do mestrado e total suporte aos experimentos.

A todos os mestres que contribuíram com a minha formação acadêmica e profissional. Em especial aos professores, Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior, Dr. José Antônio Justino Ribeiro, Dr. Wilton Ney do Amaral Pereira, Dr. Mauricio Silveira, Dr. Carlos Nazareth Motta Marins, Dr. Geraldo Gil Raimundo Gomes, MSc. Antônio Alves Ferreira Júnior e Dr. Alexandre Baratella Lugli, que despertaram em mim a paixão pela engenharia de radiofrequência e dispositivos eletrônicos.

À Rohde & Schwarz pela parceria e empréstimo dos equipamentos: geradores de sinais 4G/5G NR SMVB100A (8 kHz à 6 GHz), SGT100A (8 kHz à 3 GHz) e escâner analisador de redes móveis 2G, 3G, 4G e 5G NR TSMA6 (300 MHz à 6 GHz) para as pesquisas do WOCA. Em especial aos amigos Eng. José Reis, Eng. Ricardo Alfredo e Eng. Daniel Nagasaki, pelo suporte, apoio aos experimentos e equipamentos utilizados.

À Venturus, pela parceria e empréstimo dos equipamentos da Rohde & Schwarz: gerador de sinais 4G e 5G NR SMW200 (100 kHz à 31,8 GHz) e analisador de espectro e sinais 4G e 5G NR FSW85 (2 Hz à 85 GHz).

À Keysight pela parceria e disponibilidade das licenças dos softwares utilizados neste trabalho, *LTE Signal Studio FDD/TDD* e *5G NR Signal Studio*.

À operadora de telecomunicações TIM pela disponibilidade de utilização de seu sistema comercial 4G e 5G NR para os experimentos deste trabalho.

À Anatel, em especial ao Dr. Agostinho Linhares (Gerente de Espectro, Órbita e Radiodifusão), pela parceria, amizade, materiais técnicos, participação das discussões, motivação e sugestões para o trabalho. Foi uma honra e um aprendizado enorme poder contribuir de alguma forma para o tema proposto.

À Gisele Moreira dos Santos, da secretaria de pós-graduação, por todo suporte, apoio e carinho durante todo o período do mestrado.

Ao Instituto Nacional de Telecomunicações por proporcionar toda a infraestrutura e condições necessárias para a conclusão deste trabalho. Ao corpo docente da instituição que demonstrou estar sempre comprometido com a qualidade e excelência do ensino.

Aos órgãos de fomento à pesquisa CAPES, CNPq, RNP, Finep, MCTI e FAPEMIG, pelo apoio financeiro. À empresa ESSS, pelo suporte técnico nas simulações com a ferramenta ANSYS HFSS®.

Índice

Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xvii
Lista de Símbolos.....	xxi
Lista de Publicações.....	xxii
Resumo	xxv
Abstract.....	xxvi
Capítulo 1.....	1
1. Introdução	1
1.1. Contextualização e motivação	1
1.2. Revisão bibliográfica	3
1.3. Objetivo e contribuições.....	6
1.4. Estrutura da dissertação	7
Capítulo 2.....	9
2. Tecnologias de Comunicação sem Fio	9
2.1. LTE-A Pro	9
2.2. NB-IoT	11
2.3. 5G New Radio.....	13
Capítulo 3.....	21
3. Coexistência entre 5G NR, LTE-A Pro e NB-IoT na banda de 700 MHz.....	21
3.1. Cenário de testes	21
3.2. Coexistência de downlink em canais adjacentes.....	23
3.3. Coexistência de downlink co-canal.....	28
3.4. Walk Test em canal adjacente.....	36
Capítulo 4.....	43
4. Coexistência entre 5G NR e TVRO na Banda C.....	43
4.1. Cenários de testes.....	43
4.2. Testes de coexistência com sistema 5G NR da TIM.....	47
4.3. Testes de coexistência com gerador 5G NR de bancada.....	51
4.4. Filtro de RF para viabilizar a coexistência entre 5G NR e TVRO.....	53
4.5. Proposta de alteração do LNBF para viabilizar a coexistência entre 5G NR e TVRO.....	59
Capítulo 5.....	67

5. Conclusões e trabalhos futuros	67
Apêndice	69
Referências Bibliográficas	80

Lista de Figuras

Figura 2-1- <i>Evolução do padrão LTE [1].</i>	9
Figura 2-2 - <i>Modos de operação do NB-IoT [59].</i>	11
Figura 2-3 - <i>Cenários de uso do 5G NR. “Fonte: Qualcomm”</i>	13
Figura 2-4 - <i>Conexão dupla utilizando 4G e 5G em modo de operação NSA para 5G NR [68].</i>	14
Figura 2-5- <i>Exemplo de bandwidth parts em uma portadora 5G NR.</i>	16
Figura 2-6 - <i>Representação gráfica de EVM em uma constelação.</i>	18
Figura 3-1- <i>Diagrama em blocos do arranjo experimental para análise de coexistência.</i>	22
Figura 3-2- <i>Arranjo experimental: Antenas transmissoras.</i>	22
Figura 3-3- <i>Ilustração da análise de coexistência em canal adjacente na banda de 700 MHz.</i>	23
Figura 3-4 - <i>Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação QPSK: (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a.; (c) constelação e espectro para o ponto b.</i>	24
Figura 3-5 - <i>Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação 16-QAM: (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a.; (c) constelação e espectro para o ponto b.</i>	26
Figura 3-6 – <i>Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação 64 QAM : (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a.; (c) constelação e espectro para o ponto b.</i>	27
Figura 3-7 – <i>Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação 256 QAM: (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a.; (c) constelação e espectro para o ponto b.</i>	28
Figura 3-8 – <i>Ilustração da análise de coexistência co-canal entre 5G NR, LTE-A Pro e NB-IoT na banda de 700 MHz.</i>	29
Figura 3-9 – <i>Exemplo de alocação de recursos no tempo e frequência usando o CORESET [14].</i>	29
Figura 3-10 – <i>Alocação de recursos no tempo e frequência do 5G NR utilizando o CORESET: (a) espaçamento de subportadora de 15 kHz em um canal de 10 MHz; (b) espaçamento de subportadora de 30 kHz em um canal de 10 MHz; (c) para 30 kHz de espaçamento de subportadora em um canal de 15 MHz.</i>	31
Figura 3-11 – <i>Espectro 5G NR e constelação, configurados utilizando o CORESET.</i>	32

Figura 3-12 – Mapeamento de recursos para o LTE A Pro e NB-IoT.....	33
Figura 3-13 – Espectro do canal de 10 MHz compartilhado entre o LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR e constelações demoduladas: (a) constelação do sinal 5G NR; (b) constelação do LTE A Pro; (c) constelação do NB-IoT em modo autônomo – Cell Id 1; (d) constelação do NB-IoT modo intervalo de guarda – Cell Id 2; (e) constelação do NB-IoT modo intervalo de guarda – Cell Id 3.	34
Figura 3-14 – Escâner TSMA6 da empresa Rohde & Schwarz.	36
Figura 3-15 – Gerador de sinais 5G NR: modelo SMBV100A da empresa Rohde & Schwarz.	36
Figura 3-16 – Ambientes e equipamentos para o walk test: (a) planta baixa dos Prédios 2, 3, 4 do Inatel com destaque para a área de realização do walk test; (b) gerador de sinais 5G NR e equipamentos do walk test na banda de 700 MHz instalados no Prédio 02 (Térreo).....	37
Figura 3-17 – Detecção das tecnologias 4G na banda de 700 MHz.	38
Figura 3-18 – Resultado do walk test – 5G NR SS-RSRP: (a) medição do SS-RSRP 5G NR para o térreo; (b) medição do SS-RSRP 5G NR para o 1 ^o andar.	39
Figura 3-19 - Resultado do walk test – 5G NR SS-SINR: (a) (a) medição do SS-SINR 5G NR para o térreo; (b) medição do SS-SINR 5G NR para o 1 ^o andar.	41
Figura 3-20 - Resultado do walk test – 5G NR SS-RSRQ: (a) (a) medição do SS-RSRQ 5G NR para o térreo; (b) medição do SS-RSRQ 5G NR para o 1 ^o andar.	42
Figura 4-1 - Arranjo experimental para teste de coexistência entre 5G NR e TVRO.	44
Figura 4-2 – Espectro e constelação do sinal 5G NR em 3,47 GHz.....	45
Figura 4-3 - Arranjo experimental para teste de coexistência entre 5G NR e TVRO utilizando rádio comercial 5G da operadora TIM.	45
Figura 4-4 – Parque de antenas do Inatel utilizado para os experimentos.	46
Figura 4-5 - Espectro do sinal 5G NR transmitido pelo rádio da operadora TIM.	46
Figura 4-6 – Relatório fotográfico: (a) vista aérea dos pontos analisados; (b) fotografia do experimento.	47
Figura 4-7 – Imagem da TV no Ponto 1 com interferência do sinal 5G NR.	48
Figura 4-8 – Diagrama em blocos do LNBF e ilustração da análise em função da frequência.	49
Figura 4-9 – Imagem de TV no Ponto 1 e espectro de FI com presença do 5G NR.	50
Figura 4-10 – Imagem da TV com interferência e espectro de frequências em frequência intermediária: (a) imagem da TV com interferência; (b) espectro de frequência intermediária com a presença de interferência 5G no Ponto 2.	50
Figura 4-11 – Arranjo experimental utilizando um gerador de sinais 5G NR.	51
Figura 4-12 – Espectro de frequência intermediária sem sinal interferente.	52
Figura 4-13 - Espectro de frequência intermediária na presença do sinal interferente 5G NR.	52
Figura 4-14 – Imagem da TV para diferentes níveis de interferência 5G NR: (a) -48dBm; (b) -46 dBm; (c) -41 dBm.	53
Figura 4-15 – Filtro de RF proposto para viabilizar a coexistência entre 5G NR e TVRO.	55
Figura 4-16 –Parâmetros de espalhamento S, medidos e simulados do filtro do tipo “hairpin” proposto; (a) medições; (b) S11; (c) S22; (d) S21; (e) S12.....	59
Figura 4-17 – Diagrama em blocos de um LNBF genérico simulado.	61
Figura 4-18 - Diagrama em blocos do LNBF proposto e simulado.....	62

Figura 4-19 - *Diagrama em blocos do LNBF proposto considerando o filtro de RF após o primeiro estágio amplificador. 65*

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características do sinal 5G NR para diferentes numerologias [68].	15
Tabela 2.2 - Exemplos de taxas de dados típicas para alguns cenários 5G NR.	20
Tabela 3.1 - Análise de desempenho de demodulação dos sinais e canais do 5G NR.	32
Tabela 3.2 - Desempenho em termos de EVM_{RMS} dos canais de controle e de dados para o cenário de coexistência co-canal entre LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR.	35
Tabela 4.1 - Canais do satélite Star One C2 que necessitam ser realocados.	56
Tabela 4.2 - Dimensões do filtro de RF proposto.	57
Tabela 4.3 - Análise numérica do LNBF genérico.	61
Tabela 4.4 - Análise numérica do LNBF proposto.	63
Tabela 4.5 - Cálculo da distância de proteção segundo ITU-R SF.1486 para a solução comercial e soluções propostas com sinal interferente centrado em 3.550 MHz.	64
Tabela 4.6 - Cálculo da distância de proteção segundo ITU-R SF.1486 para a solução comercial e soluções propostas com sinal interferente centrado em 3.450 MHz.	64

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Sistema de Telefonia Móvel de Quarta Geração</i>
5G	<i>Sistema de Telefonia Móvel de Quinta Geração</i>
5G NR	<i>5G New Radio</i>
5GC	<i>5G Core</i>
ACK	<i>Acknowledgment</i>
ANATEL	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i>
BPSK	<i>Binary phase shift keying</i>
BWP	<i>Bandwidth part</i>
CRS	<i>Cell reference signal</i>
CSI	<i>Channel state indicator</i>
CSI-RS	<i>Channel state indicator- reference signal</i>
CSI-RSRP	<i>Channel state information – receive signal receive power</i>
CSI-RSRQ	<i>Channel state information – receive signal receive quality</i>
CSI-SINR	<i>Channel state information – signal interference noise ratio</i>
CoMP	<i>Coordinated multipoint</i>
DC	<i>Dual-connectivity</i>
DCI	<i>Downlink control information</i>
DMRS	<i>Demodulation reference signal</i>
DVB-S2	<i>Digital Video Broadcasting -Satellite (Second Generation)</i>
eIMTA	<i>Enhanced interference mitigation and traffic adaptation</i>
eLAA	<i>Enhanced license assistance access</i>
eMBB	<i>Enhanced mobile broadband</i>
eNodeB	<i>Enhanced NodeB</i>
EPC	<i>Evolved packet core</i>

EVM	<i>Error vector magnitude</i>
FDD	<i>Frequency division duplex</i>
FR1	<i>Frequency range 1</i>
FR2	<i>Frequency range 2</i>
FSS	<i>Fixed satellite service</i>
gNodeB	<i>5G NR nodeB</i>
GPRS	<i>General packet radio service</i>
HARQ	<i>Hybrid automatic repeat request</i>
HD	<i>High definition</i>
HFSS	<i>High frequency structure simulator</i>
ICIC	<i>Inter-cell interference coordination</i>
IMT	<i>International mobile telecommunication</i>
IoT	<i>Internet of things</i>
ITS	<i>Intelligent transportation systems</i>
ITU	<i>International telecommunication union</i>
KPI	<i>Key performance indicator</i>
LAA	<i>Licensed assistance access</i>
LAA-LTE	<i>Licensed assisted access long term evolution</i>
LDPC	<i>Low data parity code</i>
LNA	<i>Low noise amplifier</i>
LNB	<i>Low noise block</i>
LNBF	<i>Low noise block feeder</i>
LTE	<i>Long term evolution</i>
LTE-A	<i>Long term evolution advanced</i>
LTE-A Pro	<i>Long term evolution advanced pro</i>
M2M	<i>Machine-to-machine</i>
MAC PDU	<i>Medium access control protocol data unit</i>
MCS	<i>Modulation code scheme</i>
MCL	<i>Maximum coupling loss</i>
MIB	<i>Master information block</i>
MIB-NB	<i>Master information block – narrow band</i>
MIMO	<i>Multiple input multiple output</i>

MR-DC	<i>Multi-radio dual-connectivity</i>
MTC	<i>Machine-type communication</i>
NB-IoT	<i>Narrow band internet of things</i>
NSA	<i>Non-standalone mode</i>
NPDCCH	<i>Narrowband physical downlink control channel</i>
NPDSCH	<i>Narrowband physical downlink shared channel</i>
NPBCH	<i>Narrowband physical broadcast channel</i>
NPSS	<i>Narrowband primary synchronization signal</i>
NSSS	<i>Narrowband secondary synchronization signal</i>
OFDM	<i>Orthogonal frequency division multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal frequency division multiplexing access</i>
PBCH	<i>Physical broadcast channel</i>
PCI	<i>Physical cell identification</i>
PDSCH	<i>Physical downlink shared channel</i>
PDU	<i>Packet data unit</i>
PLL	<i>Phased locked loop</i>
PRB	<i>Physical resource block</i>
PSS	<i>Primary synchronization signal</i>
PTRS	<i>Phase-tracking reference signal</i>
QAM	<i>Quadrature amplitude modulation</i>
QCL	<i>Quasi co-location</i>
QPSK	<i>Quadrature phase shift keying</i>
RB	<i>Resource block</i>
RSRP	<i>Reference signal received power</i>
RSRQ	<i>Reference signal received quality</i>
SA	<i>Standalone</i>
SINR	<i>Signal interference noise ratio</i>
SNR	<i>Signal to noise ratio</i>
SSB	<i>Synchronization signal block</i>
SS-RSRP	<i>Synchronization signal reference signal received power</i>
SS-RSRQ	<i>Synchronization signal reference signal received quality</i>
SS-SINR	<i>Synchronization signal signal interference noise ratio</i>

SSS	<i>Secondary synchronization signal</i>
TVRO	<i>Television receive only</i>
TDD	<i>Time division duplex</i>
TIM	<i>Telecom Italia mobile</i>
TTI	<i>Transmission time interval</i>
URLLC	<i>Ultra-reliable low-latency communication</i>
WiMAX	<i>Worldwide interoperability for microwave access</i>
xNB	<i>5G interface</i>

Lista de Símbolos

$EIRP_{FWA}$	Effective isotropic radiated power – fixed wireless access
f^j	Fator de escalonamento
G	Ganho da antena
L	Perda no espaço livre
N	Número de blocos de recursos
$NR_{portadora}$	Número de portadoras 5G NR
$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$	Número máximo de blocos de recursos por BWP e numerologia
$OH^{(j)}$	Sobrecarga de informações de sinalização
P_{sat}	Potência de saturação do LNBF
$Q_m^{(j)}$	Bits por símbolo da modulação escolhida
R	Fator de proteção adicional da estação satelital
R_{max}	Taxa de codificação máxima
$RSSI$	Received signal strength indicator
$RSRP$	Reference signal received power
SS	Synchronization signal
T_s^μ	Tempo médio de duração de símbolos por numerologia
$v_{camadas}^j$	Número de camadas

Lista de Publicações

Periódicos:

[1] **L. C. Alexandre**, A. L. de S. Filho and S. Arismar Cerqueira, "Indoor Coexistence Analysis among 5G New Radio, LTE-A and NB-IoT in the 700 MHz Band," in *IEEE Access*, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3011267](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011267), July, 2020.

[2] **Alexandre, L. C.**, L. O. Veiga, Agostinho Linhares, José R. P Moreira, M. Abreu e Arismar Cerqueira S. Jr., "Coexistence Analysis between 5G New Radio and Satellite TV (TVRO) in C-Band", in *Journal of Communication and Information Systems (JCIS)*, vol. 35, pp. 198-202, doi: [10.14209/JCIS.2020.21](https://doi.org/10.14209/JCIS.2020.21), July, 2020.

Congressos:

[3] **Alexandre, L. C.** e Arismar Cerqueira S. Jr., "Contribution for the Coexistence Analysis between 5G and 4G in the sub-1GHz Band". In: *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2019*, Aveiro, Portugal. Proceedings of IMOC 2019, 2019.

[4] **Alexandre, L. C.**, A. B. Lugli e Arismar Cerqueira S. Jr., "Uma Aplicação de Controle de Velocidade Utilizando a Rede PROFINET", *Congresso Brasileiro de Instrumentação, Sistemas e Automação (COBISA)*, Unicamp – Campinas, São Paulo, Anais do COBISA, 2019.

Laudo Técnico:

[5] **Alexandre, L. C.**, H.R.D. Filgueiras, Arismar Cerqueira S. Jr., “Coexistência entre TVRO (*Television Receive Only*), Sistemas FSS Profissionais e 5G NR (*New Radio*) em Banda C”. Laudo técnico elaborado para a Telefônica Brasil. O documento aborda limitações técnicas dos LNBFs comerciais e propostas de melhorias eletrônicas para viabilizar a coexistência entre TVROs e sistema 5G NR em banda C. Adicionalmente apresenta-se as soluções comerciais existentes para viabilizar a coexistência entre FSS profissional e o 5G NR em banda C, *Inatel Competence Center*, Julho, 2020.

Reportagens:

[6] Arismar Cerqueira S. Jr., “Falta de definição sobre parabólicas usadas na TV aberta pode adiar leilão de 5G para 2021”. *Jornal O Globo - Economia*, disponível em <<https://oglobo.globo.com/economia/falta-de-definicao-sobre-parabolicas-usadas-na-tv-aberta-pode-adiar-leilao-de-5g-para-2021-23966768>>, 2019.

[7] Arismar Cerqueira S. Jr., **Alexandre, L. C.** e Agostinho Linhares, “Inatel desenvolve solução para convivência do 5G e banda C em 3,5 GHz”, *Portal Teletime*, disponível em <<https://teletime.com.br/17/12/2019/inatel-desenvolve-solucao-para-convivencia-do-5g-e-banda-c-em-35-ghz/>>, 2019.

[8] Arismar Cerqueira S. Jr., **Alexandre, L. C.** e Agostinho Linhares, “Pesquisa do Inatel sobre interferências do 5G no sinal de TV via satélite pode beneficiar milhões de pessoas”, *Revista Ipesi*, disponível em <<https://ipesi.com.br/pesquisa-do-inatel-sobre-interferencias-do-5g-no-sinal-de-tv-via-satelite-pode-beneficiar-milhoes-de-pessoas/>>, 2019.

[9] Arismar Cerqueira S. Jr., **Alexandre, L. C.** e Agostinho Linhares, “Inatel desenvolve solução de baixo custo para convivência do 5G e TVRO em 3,5 GHz”, Portal Telaviva, disponível em <<https://telaviva.com.br/18/12/2019/inatel-desenvolve-solucao-de-baixo-custo-para-convivencia-do-5g-e-tvro-em-35-ghz/>>, 2019.

[10] Arismar Cerqueira S. Jr., “Pesquisa do Inatel beneficiará 20 milhões de residências”, Jornal Diário do Comércio, disponível em <<https://diariodocomercio.com.br/inovacao/pesquisa-do-inatel-beneficiara-20-milhoes-de-residencias/>>, 2019.

[11] Arismar Cerqueira S. Jr., **Alexandre, L. C.** e Agostinho Linhares, “TV via satélite e 5G são temas de pesquisa do Inatel”, Portal OverBr, disponível em <<https://overbr.com.br/noticias/tv-via-satelite-e-5g-sao-bases-de-pesquisa-do-inatel/>>, 2019.

[12] Arismar Cerqueira S. Jr., **Alexandre, L. C.** e Agostinho Linhares, “Pesquisa desenvolve solução de baixo custo que garante sinal de parabólica para população”, Portal Leopoldinense, disponível em <<https://leopoldinense.com.br/noticia/16468/pesquisa-desenvolve-solucao-de-baixo-custo-que-garante-sinal-de-parabolica-para-populacao/>>, 2019.

Resumo

Este trabalho apresenta análises experimentais de coexistência do novo padrão de 5ª geração de telefonia móvel (5G), conhecido como 5G *New Radio* (5G NR), com comunicações sem fio terrestres e satelitais na faixa espectral de 700 MHz e na Banda C, respectivamente. Inicialmente, apresenta-se os resultados de desempenho da coexistência entre 5G e a 4ª geração de telefonia móvel (4G), utilizando as tecnologias *Long Term Evolution Advanced Pro* (LTE-A Pro) e *Narrow Band Internet of Things* (NB-IoT), em condições de canal adjacente e co-canal na banda de 700 MHz. A segunda fase é concernente à coexistência entre 5G NR na banda de 3,5 GHz e sistemas TVRO (*Television Receive Only*) operando de 3.625 a 4.200 MHz. As métricas de desempenho foram magnitude do erro vetorial médio (*error vector magnitude* ou EVM) para os experimentos entre 5G e 4G e qualidade da imagem de canais analógicos e digitais do sistema TVRO na presença do sinal interferente 5G.

Resultados práticos demonstram a coexistência pacífica entre 5G e 4G para *offsets* de frequência maiores que 9,4 MHz e até mesmo para condições de co-canal, por meio do uso da funcionalidade CORESET do padrão 5G NR. Por outro lado, comprova-se que sistemas 5G operando na banda de 3,5 GHz podem degradar significativamente a qualidade de canais analógicos e digitais para distâncias inferiores a 120 metros. Visando mitigar este problema, que pode atingir aproximadamente 22 milhões de lares Brasileiros, segundo a pesquisa nacional de amostra por domicílios (PNAD), propõe-se adaptações nos blocos do LNBF (*Low Noise Block Feeder*) das antenas parabólicas atuais e relata-se o desenvolvimento de um filtro de RF de alto desempenho e baixo custo, capaz de rejeitar até 59 dB do sinal 5G interferente. As adaptações do ponto de compressão de 1dB do LNBF e a eficácia do filtro de RF proposto são validadas analiticamente, utilizando a recomendação da ITU (*International Telecommunication Union*). Desta maneira, demonstra-se uma redução significativa da distância de proteção sistema TVRO de 30,2 quilômetros para 133 metros.

Palavras-chave: 4G, 5G, coexistência, LTE-A Pro, NB-IoT, satélite e TVRO.

Abstract

This work reports experimental coexistence analyses of the fifth generation of mobile network (5G) new standard named as 5G New Radio (5G NR), with terrestrial and satellite wireless communications in the 700 MHz- and C-bands, respectively. Initially, performance results of the coexistence between 5G and the fourth generation of mobile network (4G) are presented, using Long Term Evolution Advanced Pro (LTE-A Pro) and Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) technologies, under adjacent channel and co-channel conditions in the 700 MHz band. The second phase concerns the coexistence between 5G NR and TVRO (Television Receive Only) systems in the 3.5 GHz band, operating from 3625 to 4200 MHz. The evaluated performance metrics were error vector magnitude (EVM) for the experiments between 5G and 4G and image quality of the analog and digital channels of TVRO system in the presence of the interfering 5G signal.

Experimental results demonstrate a peaceful coexistence between 5G and 4G for frequency offsets greater than 9.4 MHz and even for co-channel conditions, by means of using the 5G NR CORESET feature. On the other hand, it is proven 5G systems operating in the 3.5 GHz band might significantly degrade the quality of analog and digital channels for distances lower than 120 meters. Aiming to mitigate this problem, which might reach approximately 22 million Brazilian households, according to the national household sample survey, adaptations on the LNBF (Low Noise Block Feeder) blocks of the current satellite dishes are proposed, as well as the development of high performance and low-cost RF filter, capable of rejecting up to 59 dB of the interfering 5G signal. The proposed adaptations on the 1dB compression point of the LNBF and the proposed RF filter applicability are analytically validated, using ITU (International Telecommunication Union) recommendation. In this way, it is proved a TVRO system protection distance significant reduction from 30.2 kilometers to 133 meters.

Keywords: 4G, 5G, coexistence, LTE-A Pro, NB-IoT, satellite and TVRO.

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Contextualização e motivação

As primeiras redes de telefonia móvel de quarta geração (4G) foram inicialmente especificadas em 2008 por meio da *Release 8* do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), que introduziu o padrão conhecido como *Long Term Evolution* (LTE) [1]. Posteriormente, o LTE evoluiu para o *LTE Advanced* (LTE-A), cujas especificações atendem aos critérios do *International Mobile Telecommunication - Advanced* (IMT-Advanced) e estão definidas na *Release 10* do 3GPP [1, 2]. O LTE-A incorporou diversas funcionalidades, incluindo a flexibilidade de uso do espectro de frequências para a agregação de portadoras; melhorias nos sistemas de múltiplas entradas múltiplas saídas (MIMO - *Multiple input multiple output*). A coordenação de interferência para implantação de novas redes; recursos para transmissão de vídeo em alta definição (HD, *high definition*) e realidade virtual. Aplicações orientadas a serviço, que se relacionam ao desenvolvimento de comunicações entre máquinas (M2M, *machine-to-machine*) e conexão via Internet entre dispositivos diversos (IoT, *Internet of things*). Outro importante requisito, definido na *Release 10*, foi a compatibilidade com versões anteriores, permitindo que dispositivos LTE fossem habilitados para acesso às redes LTE-A [1-4]. Contudo, esses dispositivos não se beneficiam dos recursos tecnológicos implantados no LTE-A.

Em 2012, o 3GPP lançou a *Release 11* do LTE-A [5, 6], que estabeleceu funcionalidades relativas à interface de rádio para coordenação multiponto (CoMP, *coordinated multipoint*) na transmissão e recepção de sinais. Além disso, realizaram-

se melhorias pontuais em recursos já implementados na *Release* 10 e relacionados à agregação de portadoras, aos canais de controle e aos dispositivos móveis. A *Release* 12, publicada em 2014, definiu o desenvolvimento de pequenas células com dupla conexão, maiores recursos para mitigação de interferências e adaptação de tráfego (eIMTA, *enhanced interference mitigation and traffic adaptation*), assim como novas aplicações concernentes à M2M (*Machine-to-machine*) e IoT (*Internet of Things*) para redução da complexidade na comunicação [7].

A *Release* 13, datada de 2015, introduziram-se as especificações do LTE *Advanced Pro* (LTE-A Pro), comercialmente denominado 4,5G [7]. Delimitou-se a transição de tecnologia entre o 4G e as primeiras alterações tecnológicas, visando o novo padrão físico aéreo das futuras redes celulares de quinta geração (5G). Essa *release* proveu melhorias no suporte a utilização de espectro de frequências não licenciado, agregação de portadoras e tecnologia MIMO; novos recursos para M2M; e a inserção do suporte a NB-IoT [8-11]. A *Release* 13 tem sido implantada nas *eNodeBs* (*enhanced NodeB*), sendo particularmente voltada a altas taxas de dados e ao suporte a dispositivos IoT [8-11]. Por fim, a *Release* 14 contém avanços no sistema de transmissão, agregação de portadoras, melhorias no sistema MIMO, comunicação entre máquinas e dispositivos IoT [12].

A evolução do padrão LTE para LTE-A Pro exigiu a retro compatibilidade entre os dispositivos móveis legados e *eNodeBs* atuais. Consequentemente, limitou-se a evolução do LTE-A Pro em relação à taxa de dados e ao suporte em tecnologias emergentes. Nesse contexto, a União Internacional das Telecomunicações (ITU, *International Telecommunications Union*) e seus parceiros definiram os requisitos contidos no IMT-2020 para o desenvolvimento de uma quinta geração de telefonia móvel, denominada 5G [13-14]. Os sistemas 5G possibilitam aos usuários maior vazão de dados e flexibilidade em aplicações voltadas a serviços e tecnologias emergentes [14]. As especificações iniciais do 5G estão contidas na *Release 15*, das quais definem a interface de rádio denominada de 5G *New Radio* (5G NR). Inicialmente, o 5G NR deve operar ancorado ao *core* 4G LTE para acesso e mobilidade, designando o modo de operação *non-standalone* (NSA) [14].

Para o 5G NR, o compartilhamento de espectro de frequências é considerado uma peça chave para atender os pré-requisitos definidos pelo IMT-2020 [14]. Deste modo, o 5G NR pode operar em bandas de frequências previamente ocupadas por sistemas de comunicações terrestre e satelitais. Esta coexistência pode ocasionar problemas em operações co-canais e canais adjacentes, tornando necessário o estudo de convivência entre o 5G NR e tecnologias pré-existentes. Dentre as possíveis aplicações das redes 5G, estuda-se a cobertura de áreas remotas, visando as inclusões social e tecnológica de 3,9 bilhões de pessoas que ainda não possuem acesso à Internet [15]. Para isso, o projeto de pesquisa com foco em soluções práticas para o acesso à internet em áreas remotas e rurais, 5G RANGE (*Remote Area Access Network for 5th Generation*), propõe a utilização da faixa de 700 MHz devido as melhores condições de propagação do sinal, permitindo atingir maior cobertura [16, 17]. Contudo, 44,7% das redes de telefonia móvel da América Latina utilizavam, em 2018, o espectro de 700 MHz segundo pesquisas realizadas pelo grupo 5G Americas [18]. Por outro lado, prevê-se a implantação de redes 5G na Banda C para prover cobertura a áreas urbanas, porém essa porção do espectro é utilizada por sistema de recepção via satélite de TV com canais analógicos e digitais (TVRO, *Television Receive Only*) [14, 21]. Particularmente no Brasil, segundo a pesquisa nacional por amostra de domicílios (PNAD), existem aproximadamente 22 milhões de residências que utilizam o sistema TVRO para recepção de canais de televisão.

1.2. Revisão bibliográfica

Diversos grupos no mundo têm realizado pesquisa sobre a coexistência sobre a coexistência entre 4G e 5G [19-30]. A implantação de redes 5G sobre as redes LTE-A existentes, utilizando multiplexação por divisão de frequência (FDD, *frequency division duplex*) na banda supracitada [20]. A primeira versão do modo *non-standalone* (NSA), lançado em dezembro de 2017, representou um avanço importante para viabilização da rede. O *Release 15* do 3GPP também padronizou o modo *stand-alone* (SA) e o modo de conexão dupla (DC, *dual-connectivity*) entre 5G NR e LTE [21-23]. As primeiras redes de quinta geração são baseadas no modo NSA, em que o EPC (*evolved packet core*) coordena múltiplas tecnologias e provê o agendamento de múltiplos serviços, dando origem ao modo DC. Assim, o dispositivo móvel pode ser

conectado simultaneamente a duas células, já que o plano de usuário 5G NR é o do LTE-A Pro, sendo ambos são coordenados pelo EPC [21- 27].

Wan *et al.* [19, 24] propuseram o estudo de coexistência entre o 5G NR e o LTE em Banda C. Obteve-se um aumento de cobertura explorando a utilização da faixa de espectro do LTE para *uplink*. Roessler [20] analisou o impacto do compartilhamento de espectro entre o 5G e LTE em 3,5 GHz nos Estados Unidos. Reportaram-se os desafios e possíveis restrições em relação ao modo de acesso de cada tecnologia visando a coexistência por meio de testes de laboratório. Além disso, apresentaram-se metodologias de compartilhamento de espectro em *downlink*. Kim *et al.* [25] investigaram a coexistência entre sinais de *uplink* NB-IoT e LTE. Utilizando espaçamento entre subportadoras de 15 e 3,75 kHz para sinais de *uplink* LTE e NB- IoT, respectivamente. Verificou-se a necessidade da reserva de blocos de recurso (RBs, *resource block*) do LTE vizinhos às portadoras NB-IoT para evitar interferências.

O uso de espectro não licenciado para desenvolvimento de redes 5G foi alvo de discussões em [27]. Demonstrou-se a importância de soluções econômicas utilizando fatias de espectro não licenciadas e ociosas como opção para o 5G. Demmer *et al.* [28] propuseram uma solução analítica de coexistência fundada em níveis de distorção relacionados a falta de um intervalo de guarda entre *bandwidth parts* (BWP) com diferentes numerologias 5G NR. Obtiveram-se métricas para futuros algoritmos de alocação e gerência de qualidade de serviço, dada uma relação sinal ruído interferência (SINR). Em [29], apresentou-se estudos concernentes a coexistência de *uplink* entre 5G e 4G em Banda C, visando uma perfeita cobertura utilizando sites LTE já existentes [29]. Propôs-se a utilização de um canal comum para o LTE e 5G NR, com um único intervalo de guarda entre RBs. Desta forma, eliminou-se a necessidade de deslocar subportadoras para o 5G NR, desde que a precisão de controle de potência seja satisfatória para que o desempenho do LTE não seja afetado. Finalmente, os recursos limitados de espectro motivaram pesquisas e evolução do *licensed assisted access-long term evolution* (LAA-LTE) [30]. Essa tecnologia opera em um espectro não licenciado e permite a convivência oportunista e harmoniosa entre LTE e outros sistemas de comunicações sem fio.

Concomitante, pesquisas relativas à coexistência entre 5G e estações fixas de satélite (FSS, *fixed satellite service*), como TVRO, se tornaram de grande importância devido à possibilidade de interferência entre essas tecnologias [31-36]. Análises numéricas em um cenário de coexistência co-canal entre 5G e FSS em 3,8 GHz resultaram em uma distância mínima de 15 km para atender o critério de 95% de proteção contra interferência proposta [31]. O estudo de natureza determinística permitiu estabelecer uma distância mínima de proteção entre FSS e sistemas de comunicações móveis. Tan *et al.* [32] realizaram uma análise numérica e experimental de coexistência entre 5G e sistemas de recepção satelital operando entre 3,4 e 3,6 GHz. O sistema de recepção foi composto por filtros e LNBS (*Low Noise Block*) comerciais de alta performance com osciladores *phased locked loop* (PLL). Avaliaram-se situações de proteção da FSS, qualidade de imagem e origem da interferência em diversos cenários. Em [33] analisou-se a interferência do sinal 4G/5G em um sistema móvel de recepção de dados via satélite.

Adicionalmente, realizou-se uma análise de compartilhamento de espectro entre o 5G e uma FSS operando em 28 GHz, baseado na alocação de frequências para este tipo de serviço no hemisfério norte [34]. Utilizou-se de um modelo matemático para cálculo de interferência entre os sistemas em cenários de canal adjacente e co-canal. Como principal resultado encontrou-se uma distância mínima de 20 e 7 km entre sistemas 5G e FSS para operações 5G com larguras de banda de 125 MHz e 1 GHz, respectivamente. Fernandes e Linhares [35] propuseram e analisaram a interferência entre sistemas satelitais e terrestres operando simultaneamente em uma mesma frequência. Por meio de cálculos analíticos, propôs-se distâncias mínimas de separação entre os sistemas para evitar possíveis interferências. Posteriormente, investigou-se a coexistência entre sistemas de comunicações móveis e TVRO na banda C [36]. Para a convivência entre sinais 4G e TVRO, análises analíticas demonstraram a restrição de operação entre essas tecnologias devido à baixa qualidade dos sistemas de recepção de TVRO. Os estudos contemplaram cenários de coexistência com separação mínima entre a estação transmissora 4G e o receptor TVRO. Adicionalmente, como solução técnica foi proposto a utilização de filtros de RF robustos, modificações de posição da estação receptora de satélite e blindagem nas antenas.

1.3. Objetivo e contribuições

Este trabalho tem por objetivo análises experimentais de coexistência da tecnologia 5G NR com comunicações terrestres e satelitais. A princípio, propõem-se cenários de coexistência terrestre na banda de 700 MHz para análise da convivência entre sinais 5G NR, LTE-A Pro e NB-IoT, operando em canais adjacentes e co-canais. Avaliou-se então a coexistência entre sistemas 5G NR e TVRO em Banda C. Esse estudo é tema de discussão do edital do Leilão do 5G no Brasil, dado que os sistemas TVRO atendem aproximadamente 22 milhões de residências brasileiras [37]. Adicionalmente, desenvolve-se um filtro planar de baixo custo quando se comparado a filtros de cavidades, aliado a alterações do circuito de recepção e conversão de sistemas TVRO para prover maior proteção contra o efeito *receiver blocking*, que reduz o desempenho dos circuitos de recepção ocasionando dessensibilização do receptor mediante fortes emissões de radiofrequência indesejáveis presentes em canais adjacentes ou co-canais em sistemas de comunicações.

O presente trabalho apresenta as seguintes contribuições:

- Estudo e avaliação dos cenários de coexistência terrestre entre 4G e 5G em canal adjacente e co-canal, utilizando diversos esquemas de modulações padronizados pelo 3GPP em função da magnitude do erro vetorial médio (EVM_{RMS} , *error vector magnitude*);
- A proposta de uso do recurso CORESET do padrão 5G NR para viabilizar a coexistência co-canal por meio do desligamento de subportadoras OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), alocando adequadamente blocos de recurso na frequência e no tempo para evitar colisão com sinais de controle e de dados da portadora 4G;
- A proposta e a validação experimental da utilização de até três portadoras de *downlink* NB- IoT no cenário co-canal, com largura de banda de 10 MHz, configuradas nos modos autônomo e em intervalo de guarda, visando o uso eficiente do espectro de frequências e alocação de múltiplas tecnologias e serviços na banda de 700 MHz;
- A análise de coexistência entre 5G e sistemas TVRO em Banda C, abordando possíveis interferências, que podem afetar aproximadamente 22

milhões de residências brasileiras que utilizam o sistema TVRO. O estudo considera a variação da potência do sinal interferente (5G NR) e avalia a qualidade da imagem de TV em canais analógicos e digitais;

- Desenvolvimento de um filtro de RF planar de baixo custo com 11 pólos para aplicação em LNBF comerciais. O filtro provê alta rejeição na faixa de operação proposta para o 5G no Brasil (3,3 a 3,6 GHz), aumentando a proteção às estações satelitais terrenas contra possíveis interferências;
- Proposta de alteração dos blocos amplificadores e misturadores dos LNBFs comerciais para componentes que tenham um maior ponto de compressão de 1dB, visando aumentar a proteção contra possíveis interferências;
- Análise comparativa entre as soluções propostas com as comerciais atuais, por meio do cálculo da distância de proteção da estação terrena satelital contra interferência utilizando a recomendação da ITU-R SF.1486. Obteve-se uma redução significativa da proteção do sistema TVRO de 30,2 km para 133 m.

1.4. Estrutura da dissertação

O trabalho é estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 aborda as principais características de camada física das tecnologias LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR. Descrevem-se em detalhes os canais de controle e dados, parâmetros de caracterização de performance de rede e aplicações. No Capítulo 3, avaliam-se os cenários de testes de coexistência terrestre entre 4G e 5G na banda de 700 MHz, considerando operação em canal adjacente e co-canal. Apresentam-se resultados do *walk test* realizado no campus do Inatel, no cenário de coexistência. No Capítulo 4, descreve-se o estudo de coexistência entre a tecnologia 5G e o sistema TVRO em Banda C. Investiga-se a interferência e a degradação do sistema TVRO em função da variação do nível de potência do sinal 5G. Posteriormente, propõe-se o desenvolvimento de um filtro planar de baixo custo, que integrado aos circuitos de recepção e conversão do sistema TVRO provê maior proteção contra interferências. Além disso, ressalta-se que a integração do filtro aliada à alteração no ponto de compressão P1dB dos blocos amplificadores e misturadores eleva consideravelmente a proteção do sistema. Avalia-se a proposta analiticamente segundo recomendação do ITU-R SF.1486 para demonstrar a

viabilidade da solução. Por fim, as conclusões e os trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 5.

Capítulo 2

2. Tecnologias de Comunicação sem Fio

2.1. LTE-A Pro

O LTE constitui um padrão de comunicação de redes móveis baseado exclusivamente na comutação de pacotes, cujo desenvolvimento iniciou-se em 2004 [1, 38]. Em 2008, concluíram-se as primeiras especificações do LTE, *release 8*, sendo que a comercialização e implantação iniciaram-se em 2009. Dentre suas principais características destacam-se: operações nas bandas de frequências de 800, 900, 1800, 2100 e 2600 MHz; largura de bandas de 1,4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz; suporte à MIMO; e uso do OFDMA como técnica de multiplexação. Posteriormente, introduziram-se melhorias e novas funcionalidades ao padrão, dando origem ao LTE-A e LTE-A Pro, como ilustra a Figura 2-1 [1, 13, 38].



Figura 2-1- Evolução do padrão LTE [1].

Em sua camada física, o LTE-A Pro manteve o esquema de transmissão de *downlink* baseado em OFDM. O longo tempo de símbolo aliado ao prefixo cíclico proporciona maior robustez em canais seletivos em frequência [38, 41]. Para se adaptar às condições do canal, o LTE-A Pro utiliza a funcionalidade de agendamento de

recursos no tempo e frequência, que permite a adaptação de taxa por meio de tabelas de esquemas de códigos e modulações (MCS- *modulation code scheme*) [13, 42]. O recurso de coordenação de interferência entre células (ICIC – *inter-cell interference coordination*) possibilita mitigar a interferência oriunda do reuso de frequência. Logo, as eNodeBs trocam mensagens entre si por meio da interface X2, informando as condições de operação [13, 38]. As funcionalidades relacionadas ao uso de múltiplas antenas e à agregação de portadora evoluíram no LTE-A Pro, com o intuito de prover maior vazão de dados e preservar a estrutura física da rede [1, 5, 13, 43, 44]. O LTE-A Pro permite a agregação de no máximo 32 portadoras com largura de banda de 640 MHz e taxa de dados teórica de 25 Gbps, no *downlink* [1]. Os rádios transceptores podem operar com até 64 antenas, visando um maior número de mensagens do canal de retorno, que contém informações sobre o estado do canal (CSI- *channel state indicator*) [1]. Essa característica viabiliza o uso de recursos de *beamforming* nos planos de azimute e elevação para atender múltiplos usuários, especialmente separados [13, 45]. Tal mecanismo é denominado de MIMO de dimensão completa (*full dimension MIMO*) e precedeu a introdução do MIMO massivo (*massive MIMO*) [46, 47].

A agregação de um maior número de portadoras tornou necessária a utilização do espectro não licenciado, com o objetivo de aumentar a vazão de dados, reduzir custos e aumentar a eficiência espectral. A *release 13* definiu o LAA (*license assistance access*), que padronizou a operação do LTE-A Pro em *downlink* na banda não licenciada de Wi-Fi [13]. Na *release 14*, o LAA estendeu-se ao canal de *uplink*, sendo denominado de eLAA (*enhanced-Licensed Assisted Access*) [13, 47]. Concomitante ao desenvolvimento do LTE-A Pro, novos cenários e aplicações emergiram, por exemplo, a comunicação entre máquinas (MTC, *machine-type communication*), entre sistemas de transporte (ITS, *intelligent transportation systems*) e controle de drones. Por isso, os sistemas LTE-A Pro foram adaptados para prover suporte a essas tecnologias como redes de acesso [1, 5, 13, 48]. O LTE-A Pro precede a quinta geração de telefonia móvel (5G), cujas especificações não contemplam uma tecnologia específica de rádio. Porém, inclui aplicações que não são suportadas pelas redes LTE-A Pro [48, 49].

2.2. NB-IoT

A *release* 13 do 3GPP introduziu a tecnologia NB-IoT, que é voltada ao acesso da rede LTE-A Pro por dispositivos IoT [8, 9]. Desenvolveu-se o NB-IoT para dispositivos de baixo consumo, baixa taxa de dados e sem mobilidade, que operam em banda estreita [49-54]. O NB-IoT inclui melhorias de cobertura em áreas internas de edifícios, residências e shoppings centers com um aumento de 20 dB comparado à tecnologia legada *General Packet Radio Service* (GPRS), utilizando um dispositivo com 23 dBm de potência. Com isso, tem-se aproximadamente 164 dB de perda máxima de acoplamento (MCL, *maximum coupling loss*), operando com uma taxa de dados de 160 bps [8, 55, 56]. O esquema de transmissão de *downlink* é baseado em OFDM utilizando prefixo cíclico e espaçamento entre portadoras de 15 kHz. No domínio da frequência são alocadas 12 subportadoras consecutivas na duração de um *slot*, correspondendo a um RB [8]. Adicionalmente, cada *eNodeB* pode suportar a conexão de até 52.547 dispositivos com latência limitada a 10 segundos ou menos, que atende aos requisitos de 99% dos dispositivos IoT [8, 56]. O NB-IoT pode ser implementado em três modos de operação, conforme visto na Figura 2.2: em banda, em intervalo de guarda e autônomo. No modo de operação em banda, reserva-se um ou mais blocos de recursos LTE-A Pro ao NB-IoT, sendo a potência total da *eNodeB* compartilhada entre as tecnologias [8, 57, 58]. Contudo, ressalta-se a possibilidade de acréscimo individual de potência para a portadora NB-IoT. Esse modo de utilização provê o uso mais eficiente do recurso de espectro. No modo de operação em intervalo de guarda, o NB-IoT é instalado no espaço do prefixo cíclico inicial ou final da portadora LTE-A Pro. No modo autônomo de operação, o NB-IoT pode utilizar de um canal de 200 kHz GSM legado para sua operação [8, 59-62].

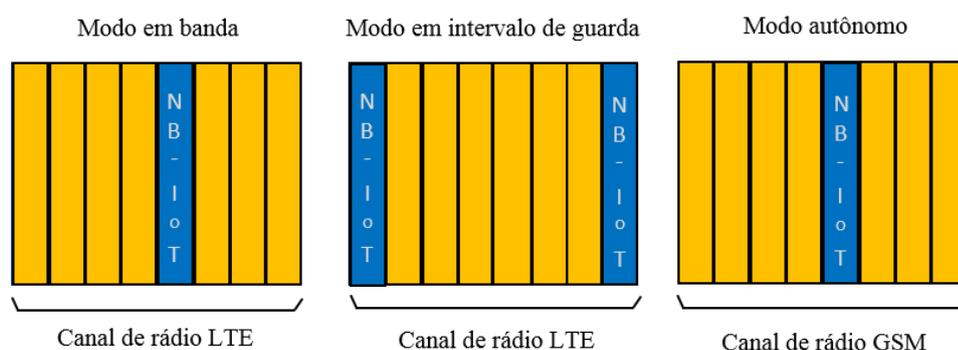


Figura 2-2 - Modos de operação do NB-IoT [59].

Para atingir largura de faixa estreita de 180 kHz, o NB-IoT possui sinais de sincronismo e canais de controle distintos em relação ao LTE-A Pro. Este trabalho aborda os seguintes canais e sinais de *downlink*: *Narrowband Physical Downlink Control Channel* (NPDCCH), *Narrowband Physical Downlink Shared Channel* (NPDSCH), *Narrowband Physical Broadcast Channel* (NPBCH), *Narrowband Reference Signal* (NRS), *Narrowband Primary Synchronization Signal* (NPSS) e *Narrowband Secondary Synchronization Signal* (NSSS) [60-66]. Os sinais NPSS e NSSS são os primeiros a serem adquiridos pelo dispositivo NB-IoT. O dispositivo IoT, assim que inicializado, começa a escanear todos os canais de RF com finalidade de adquirir uma célula presente na região de cobertura. O dispositivo adquire os sinais NPSS e NSSS para obter o endereço físico da célula em que irá se conectar, o *PHY Cell Id (Physical Cell Id)*, sendo que o NB-IoT permite que se tenha até 504 endereços físicos para identificação das células [8, 66].

O sinal NRS é utilizado pelo dispositivo de IoT no *downlink* para controle de potência e estimação de canal, onde o dispositivo IoT utiliza a informação do sinal NRS para estimar a perda no espaço livre da transmissão e calcular sua distância aproximada da eNodeB. O NPBCH é utilizado pelo dispositivo de IoT para aquisição do sinal de *broadcast PDU (Protocol data unit)*, o *Master Information Block – Narrow Band* (MIB-NB), oriundo da eNodeB e que contribui com informações essenciais para que o dispositivo opere dentro da rede NB-IoT [13, 66]. O tamanho do MIB-NB é de 34 bits e o bloco de transporte é transmitido a cada *Transmission Time Interval* (TTI) de 640 ms. Já o canal NPDSCH é responsável pelo tráfego de dados *downlink*, onde trafegam blocos de transporte contendo um *Medium Access Control Protocol Data Unit* (MAC PDU) completo. O canal NPDCCH é responsável por indicar ao dispositivo informações essenciais sobre posição e MCS dos dados transmitidos. Por fim, os esquemas de modulações utilizados pelos canais de *downlink* presentes no NB-IoT são: Zadoff-Chu para NPSS e NSSS; *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) para CRS, NPBCH, NPDSCH e NPDCCH [66].

A tecnologia NB-IoT pode ser aplicada a dispositivos móveis como rastreadores, relógios inteligentes, além de poder englobar a transmissão de múltiplos sensores conectados a vestimentas ou dispositivos para monitoramento de sinais vitais corpóreos como por exemplo taxa de batimento cardíaco e pressão sanguínea.

2.3. 5G New Radio

A primeira versão do 5G NR limitou-se ao modo de operação NSA, que será utilizado neste trabalho. A diferença entre o modo NSA e SA afeta somente as camadas superiores relacionadas ao *core* da rede, sendo a tecnologia de rádio a mesma para ambos os casos [14,67,68]. Durante o desenvolvimento da *release* 15, direcionaram-se os estudos para atender dois casos de aplicações principais, sendo o *enhanced Mobile Broadband* (eMBB) e *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC). Para aplicações massivas entre máquinas, utilizam-se as tecnologias 4G como eMTC e NB-IoT, cujos resultados são satisfatórios [14,68,69]. A evolução dessas tecnologias é prevista para a *release* 16 e 17. Os cenários previstos para a tecnologia 5G NR é ilustrado na Figura 2-3 - *Cenários de uso do 5G NR*. “Fonte: Qualcomm”. Comparado ao LTE-A Pro, a tecnologia 5G NR possui inúmeros benefícios, sendo os principais: exploração de bandas de frequências em ondas milimétricas para prover maiores taxa de dados; redução de interferências por meio de melhorias em sinais de sincronismo e controle; compatibilidade com aplicações futuras ainda não implementadas no padrão; baixa latência para atender casos específicos de aplicação; utilização de tecnologias de direcionamento de feixe (*beamforming*) agregado a um número expressivo de antenas para transmissão de sinais de dados e controle [14,68-70].

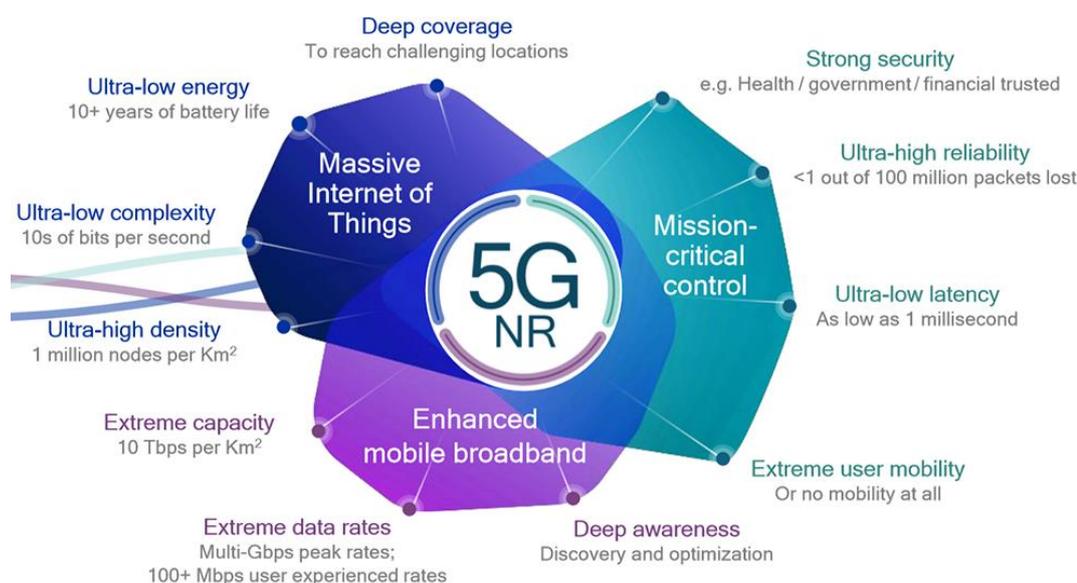


Figura 2-3 - *Cenários de uso do 5G NR*. “Fonte: Qualcomm”

Exploraram-se os cenários de conectividade do 5G NR na definição do padrão, resultando em maior flexibilidade de topologias as quais a rede pode ser

interconectada. A título de exemplo, o dispositivo móvel pode decidir se conectar à rede 4G ou 5G através do novo 5G Core (5GC) utilizando o modo SA. Entretanto, prevê-se a aplicação do modo de conexão NSA com conexão DC para acesso inicial e para promover uma transição suave entre tecnologias, Figura 2-4. Este modo permite que o dispositivo móvel se conecte simultaneamente a uma *eNodeB* e a uma *gNodeB*, sendo esta última a estação rádio base 5G NR, usufruindo dos benefícios de ambas tecnologias [14, 68-73].

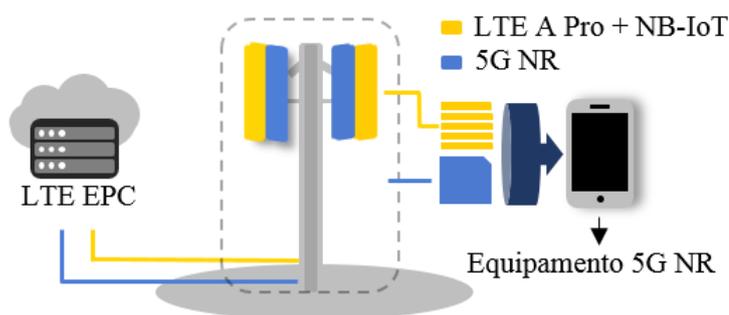


Figura 2-4 - Conexão dupla utilizando 4G e 5G em modo de operação NSA para 5G NR [68].

As duas estações rádio base são interconectadas pela interface *xNB*, podendo estar situadas em localidades distintas. No *release* 15, o modo de conexão dupla envolve duas estações 5G NR (NR-DC), ou uma estação 5G NR e uma LTE chamado de modo *Multi-Radio-DC* (MR-DC) [14, 68, 74]. Ressalta-se que apenas a tecnologia LTE é considerada como opção de conexão dupla pelo padrão, tecnologias legadas não são suportadas [68]. O 5G NR deve operar em diferentes faixas de frequência, segundo requisitos do IMT-2020. As duas seguintes faixas de frequências foram padronizadas: de 450 MHz à 7,125 GHz (FR1) e de 24,25 a 52,6 GHz (FR2) [68].

Na camada física do 5G NR, emprega-se o ODFMA com algumas modificações em relação ao padrão LTE-A Pro. Dentre elas, destacam-se novas numerologias que permitem diferentes configurações de espaçamento de subportadoras OFDM, não se limitando ao espaçamento fixo do LTE. O 5G NR permite espaçamentos de 15, 30, 60, 120 e 240 kHz, ocasionando tempo de símbolo diferente de acordo com a numerologia adotada, assim como a subdivisão adaptativa de *slots* [14, 68, 78]. Os sinais de sincronismo e dados podem ter diferentes espaçamento de subportadoras e não possuem mais espaços fixos no mapa de alocação de recursos do quadro OFDMA. Por isso, são alocados de acordo com a necessidade de cada aplicação ou cenário de

disponibilidade do espectro de frequências. A tecnologia 5G NR suporta os modos de operação FDD e *Time Division Multiplex* (TDD). O modo TDD possui certas vantagens em relação ao FDD, sendo uma delas o uso de apenas um canal para *downlink* e *uplink* com a possibilidade de estimação do canal. Como o canal é recíproco, tem-se maior facilidade de estimação do canal pelo dispositivo móvel para utilização do recurso de direcionamento de feixe. Espera-se que a maioria das implementações de sistemas 5G NR sejam em TDD, especialmente para instalações que façam o uso do espectro em ondas milimétricas [14, 68, 79].

Para compartilhamento de dados transmitidos pelo 5G NR, o canal de controle informa qual recurso está alocado para cada usuário no tempo e na frequência. Novos esquemas para MIMO, permitem até 8 camadas (*layers*) em ambos os sentidos de *downlink* e *uplink*. Um canal *broadcast* é utilizado para prover acesso inicial a rede e um canal randômico permite ao dispositivo requisitar conexão à rede por meio do canal de *uplink*. Além disso, o 5G NR utiliza de códigos corretores de erros do tipo polar para canais de controle e códigos *Low Data Parity Code* (LDPC) para canais de dados [14]. Na Tabela 2.1, comparam-se as características do sinal 5G NR para diferentes numerologias.

Tabela 2.1 - Características do sinal 5G NR para diferentes numerologias. [Adaptado de [68]].

Espaçamento de subportadora	15 kHz	30 kHz	60 kHz	120 kHz	240 kHz
Duração de símbolo (μ s)	66,7	33,3	16,7	8,33	4,17
Duração do CP (μ s)	4,7	2,3	1,2 / 4,13	0,59	0,29
Máxima largura de faixa (MHz)	50	100	100 / 200	400	400
Máximo número da FFT	4096	4096	4096	4096	4096
Símbolos por <i>slot</i>	14	14	14	14	14
<i>Slots</i> por sub quadro	1	2	4	8	16
<i>Slots</i> por quadro	10	20	40	80	160

Os canais de *downlink* para o 5G NR são: *physical broadcast channel* (PBCH), *physical downlink control channel* (PDCCH) e *physical downlink shared channel* (PDSCH) [68, 80-82]. O *Hybrid automatic repeat request* (HARQ), evoluiu para uma configuração mais adaptativa em relação ao tempo de agendamento do bloco de transporte e seus correspondentes pacotes de *acknowledgment* (ACK). O PDSCH tem função semelhante ao LTE-A Pro, sendo utilizado para envio de dados compartilhados de recursos alocados no tempo e frequência. Adicionalmente, contém pacotes de dados do usuário, mensagens de controle de camadas superiores dos dispositivos móveis,

blocos de informações para o sistema e sinais de *paging*. A principal diferença em relação a tecnologias anteriores é o grau de parametrização quanto à alocação de RBs. O PDSCH utiliza um esquema adaptativo de escolha de MCS baseado em níveis de relação sinal ruído (SNR) e aliado a uma taxa de codificação LDPC flexível. O PDCCH é utilizado para transportar informação de controle de *downlink* (DCI-*downlink control information*) com objetivo de agendar transmissões de *downlink* usando o PDSCH. A modulação QPSK e a codificação polar são utilizadas para transmissão dos dados. Por outro lado, o PBCH é uma parte do *Synchronization Signal Block* (SSB), sendo o bloco de sincronização enviado na primeira parte de largura de banda (*BWP-bandwidth part*) [14, 78]. O BWP, provê flexibilidade do uso de largura de banda onde múltiplos sinais podem ser transmitidos, sendo cada qual alocado em uma largura de banda diferente, (Figura 2-5). Cada BWP tem uma numerologia específica e relacionada a sua característica de modulação e alocação de recursos.

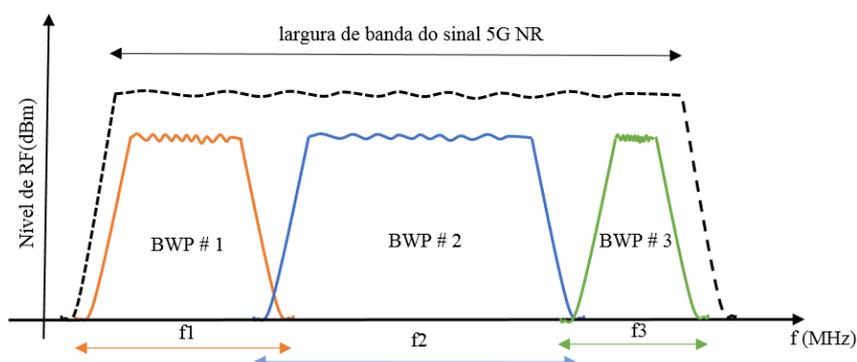


Figura 2-5- Exemplo de bandwidth parts em uma portadora 5G NR.

O PBCH tem a função principal de fornecer ao dispositivo móvel o conteúdo do *Master Information Block* (MIB), responsável pela aquisição, seleção e reconexão da célula mantendo uma sincronização no tempo e em frequência para desempenhar estas funções. O PBCH utiliza um TTI de 80ms e uma modulação QPSK com seus sinais *Demodulation reference signal* (DMRS) que podem ser utilizados para realizar o direcionamento de feixe. Cada canal físico possui sinais com funções específicas que foram definidas no padrão 5G NR [14, 68, 81]. Eles são utilizados pela camada física, entretanto não carregam informações da camada de aplicação. A principal função destes sinais está relacionada com parâmetros de sincronização, estimação de canal, parametrização para direcionamento de feixe, otimização e estado de canal. Os principais sinais utilizados e seus respectivos canais para *downlink* são: *demodulation*

reference signals (DMRS) para os canais PDSCH, PDCCH e PBCH; *phase-tracking reference signals* (PTRS) para PDSCH, *channel-state information reference signal* (CSI-RS), *tracking reference signals* (TRS), *primary synchronization signal* (PSS) e *secondary synchronization signal* (SSS) [84, 85].

Os sinais DMRS são utilizados para estimação do canal de comunicação e equalização do sinal no receptor. A rede 5G NR pode configurar a potência do sinal DMRS como referência e indicar este nível para o dispositivo móvel, que estima a atenuação entre sua posição e a gNodeB. No 5G NR, o canal pode ter sinais DMRS configurados individualmente com opções de alocação por *slot*. De acordo com as condições de propagação e/ou aplicação, pode-se configurar mais sinais DMRS e proporcionar maior robustez a rede em relação à estimação e equalização. Todavia, ter-se-á menos símbolos para transmissão de dados. O PTRS foi criado para solucionar o problema de aumento ruído de fase que surge nos métodos de conversão mediante o uso de osciladores locais. O EVM é o tamanho do vetor, que liga a posição onde o símbolo foi detectado com a referência de I/Q do vetor onde o símbolo deveria estar. O EVM pode ser calculado pela equação 2.1 e é ilustrado pela Figura 2.6. Onde n é o número do símbolo, N é o número de símbolos da constelação, I_{err} é a diferença entre a fase de referência menos a fase medida e Q_{err} é a diferença entre a quadratura de referência menos a quadratura medida. O ruído de fase é responsável pela degradação do EVM em sinais digitais, principalmente operando em altas frequências. O 3GPP definiu o PTRS no padrão 5G NR para estimar o efeito de ruído de fase introduzido ao sinal. O uso é opcional e recomendado quando se tem operação na banda FR2, devido as características intrínsecas de ruído de fase elevado em dispositivos osciladores locais operando em ondas milimétricas [68].

$$\%EVM = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{n=0}^{N-1} I_{err}[n]^2 + Q_{err}[n]^2}}{EVM_{normalizado\ de\ referência}} \quad (2.1)$$

estimação de canal inicial e medidas de avaliação de qualidade da rede com informações de *receive signal receive power* (RSRP), *receive signal receive quality* (RSRQ) e *signal interference noise ratio* (CSI-SINR) de ambos os sinais de sincronização [14, 68, 73]. O 5G NR possui até 1.008 valores de PCIs, enquanto, o LTE-A Pro somente 504. Em redes densas, ter uma maior quantidade de PCIs fornece a rede uma distância maior entre células para se fazer o reuso de frequências. Os sinais SSS e PSS utilizam modulação *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) [86, 87].

Para o 5G NR, decidiu-se modificar o conceito de categorias para dispositivos móveis que existem nas tecnologias de comunicações celulares anteriores. Não há, portanto, um número de categoria disponível que possa informar sobre capacidade máxima de taxa de dados pelo móvel. O documento TS 38.306 disponibiliza uma fórmula que calcula a máxima taxa de dados [68]:

$$\begin{aligned} \text{Taxa de dados (Mbps)} = & 10^{-6} \times \sum_{J=1}^J (v_{camadas}^J \times Q_m^{(J)} \times f^{(J)}) \\ & \times R_{max} \times \frac{N_{PRB}^{BW^{(J)},\mu}}{T_s^\mu} \times (1 - OH^{(J)}), \end{aligned} \quad (2.2)$$

na qual J é o número de componentes de portadoras agregadas na banda de operação ou em combinação de bandas, sendo o máximo de 16 componentes para agregação; R_{max} é o número máximo de taxa de codificação; v é o número máximo de camadas de rádios; Q_m é o número de bits por símbolo utilizados pela modulação utilizada; f é o fator de escala, que é sinalizado pelas camadas de aplicações, sendo que os valores de 1, 0,8, 0,75 e 0,4 são permitidos, referindo-se principalmente ao fato de que o aparelho móvel celular pode indicar uma operação de menor qualidade em relação a máxima taxa de dados calculada; N_{PRB} é máximo número de RBs por BWP; T_s é tempo médio de duração de símbolo, levando em conta a duração do CP para o primeiro símbolo OFDM; OH é a sobrecarga devido a informação de sinalização, que pode-se assumir os valores para *downlink* de 0,14 para FR1 e 0,18 para FR2 [68]. Na Tabela 2.2 - , a capacidade teórica de taxa de dados para o 5G NR para FR1 e FR2, utilizando a equação (2.1). Observa-se para FR1 em 700 MHz uma taxa máxima de 55,73 Mbps, observa-se uma taxa de dados máxima bem inferior comparação com a faixa de 3,55 GHz que pode alcançar uma taxa máxima de 1,16 Gbps com um sistema MIMO 2 x 2. Entretanto, a faixa de 700 MHz possui benefícios para aplicações de internet em áreas

remotas e principalmente ao IoT no setor do agronegócio. Por outro lado, as faixas de frequência em FR2 se mostram atraentes para comunicações com altas taxas de dados, podendo alcançar até 8,61 Gbps em MIMO 4 x 4, utilizando-se de coberturas em pequenas células.

Tabela 2.2 - Exemplos de taxas de dados típicas para alguns cenários 5G NR.

Frequência	Espaçamento de subportadora	Largura de banda	Camadas de rádio	Taxa de dados (<i>downlink</i>)
FR1 (700 MHz)	15 kHz	10 MHz	1	55,73 Mbps
FR1 (3,55 GHz)	30 kHz	100 MHz	2	1,16 Gpbs
FR2 (26 GHz)	60 kHz	200 MHz	4	4,31 Gpbs
FR2 (26 GHz)	120 kHz	400 MHz	4	8,61 Gpbs

Capítulo 3

3. Coexistência entre 5G NR, LTE-A Pro e NB-IoT na banda de 700 MHz

Esta seção apresenta os cenários de testes e os equipamentos utilizados para análise de coexistência entre o 5G NR, LTE-A e NB-IoT na banda de 700 MHz. Este estudo é de grande importância para investigar o compartilhamento de espectro eficiente na banda de 700 MHz, que provê maior cobertura visando aplicações em áreas remotas e IoT para o agronegócio. Nesse contexto, abordam-se, neste Capítulo, os resultados experimentais que demonstram o compartilhamento eficiente de espectro em canal adjacente entre tecnologias 4G e 5G e discute-se a proposta e implementação de um compartilhamento co-canal entre múltiplas tecnologias 5G NR, LTE-A Pro e NB-IoT.

3.1. Cenário de testes

Na Figura 3-1, tem-se o arranjo experimental para análise de coexistência entre sistemas de comunicações celulares terrestres na banda de 700 MHz. Utilizou-se um gerador de forma de ondas arbitrária (AWG) M82190 da Keysight para gerar a portadora de *downlink* do sinal 5G NR. Transladou-se o sinal para a frequência de canal (768 MHz) usando um gerador vetorial de sinais (PSG E8267D). Gerou-se o sinal modulado no padrão LTE A Pro e NB-IoT com um segundo gerador de sinais (EXG ASG 5173B) e com auxílio do programa de configuração *Keysight Signal Studio for LTE-FDD*.

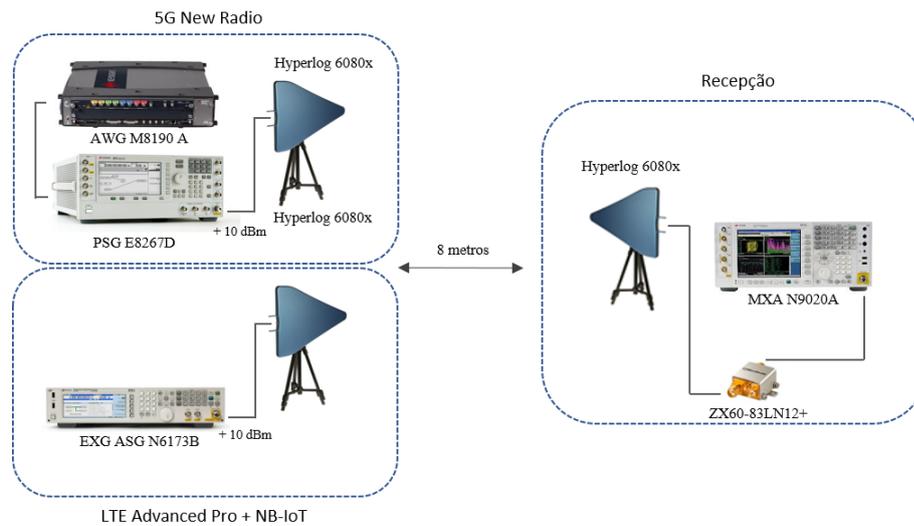


Figura 3-1- Diagrama em blocos do arranjo experimental para análise de coexistência.

O experimento foi realizado em um enlace ponto a ponto de 8 metros em visada direta, utilizando duas antenas do tipo log periódica modelo Hyperlog® 6080 da fabricante Aeronia. Diferentes antenas foram utilizadas na transmissão dos sinais 4G e 5G, uma antena para o sinal 5G NR e outra antena para os sinais LTE-A Pro e NB-IoT. No receptor, posicionou-se uma terceira única antena do tipo log periódica em conjunto com um amplificador de baixo ruído, operando entre 0,5 a 8 GHz, com 22,1 dB de ganho e 1,4 dB de figura de ruído. Analisou-se os sinais recebidos com analisador de sinais vetoriais modelo MXA N9020A da Keysight. Na Figura 3-2 apresenta-se o ambiente de teste com os equipamentos devidamente posicionados.

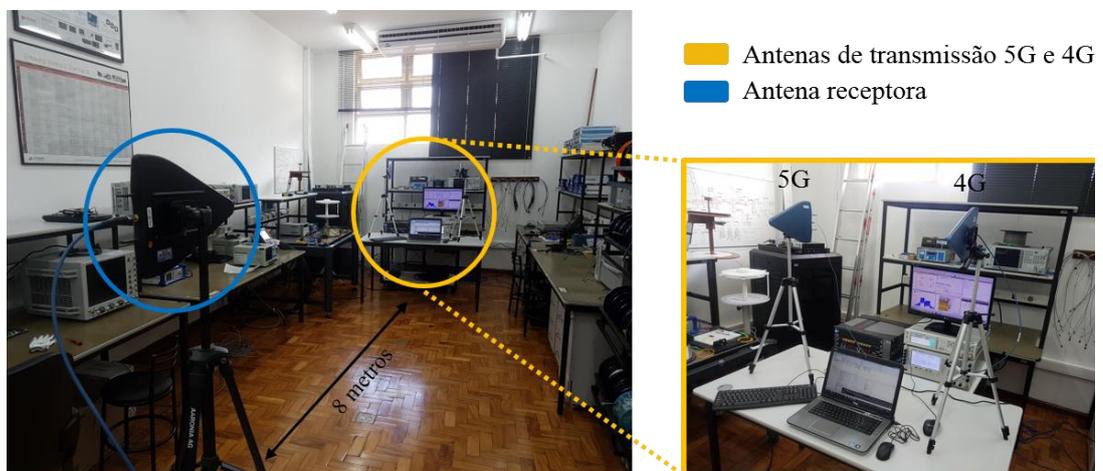


Figura 3-2- Arranjo experimental: Antenas transmissoras.

3.2 Coexistência de *downlink* em canais adjacentes

Na Figura 3-3, tem-se uma ilustração da análise de coexistência em canal adjacente entre sinais 5G NR e LTE-A Pro. Ambos operam com largura de faixa de 10 MHz e potência de saída de 10 dBm. Utilizou-se modulações QPSK, 16, 64 e 256-QAM para o sinal 5G NR e apenas 64-QAM para o LTE-A Pro.

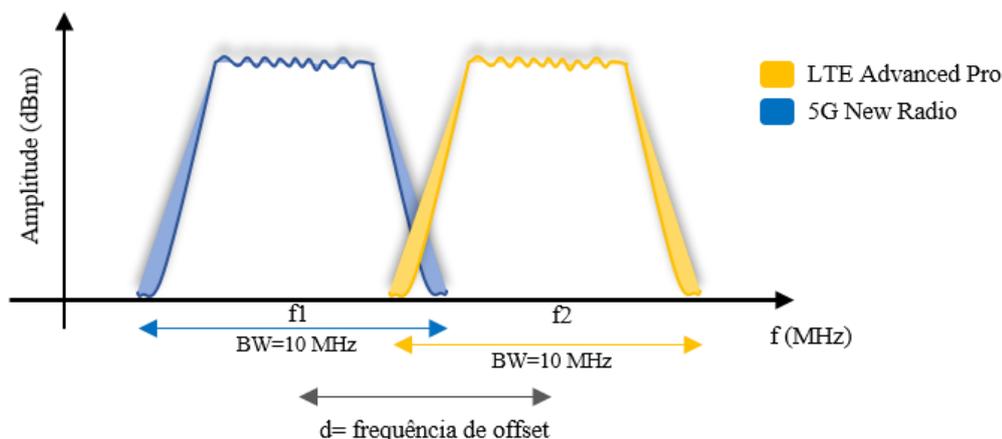
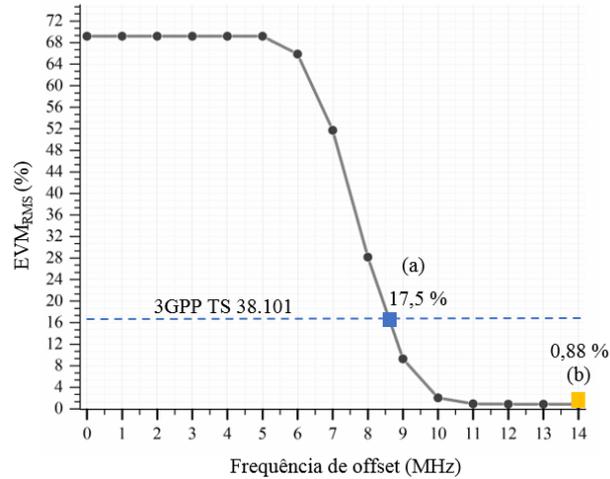


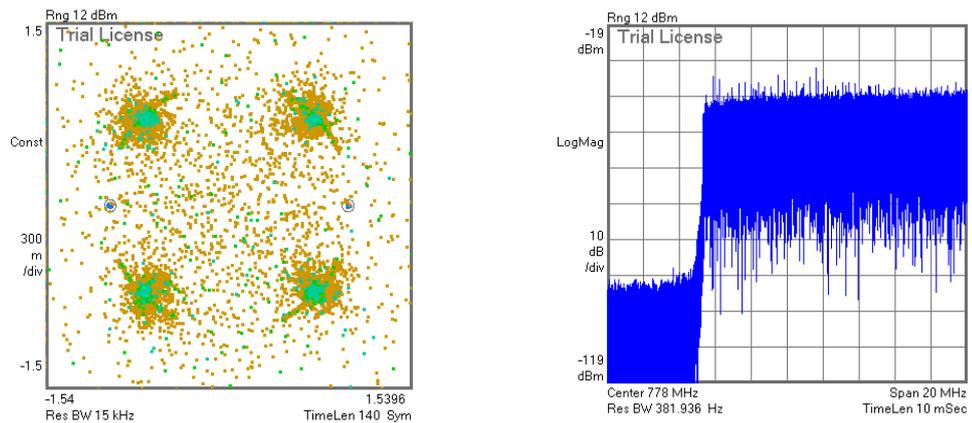
Figura 3-3- Ilustração da análise de coexistência em canal adjacente na banda de 700 MHz.

Avaliou-se a o espaçamento d (*offset* de frequência) entre as portadoras OFDM, utilizando diferentes tipos de modulações para o sinal 5G NR. Utilizou-se como métrica de desempenho a magnitude do erro vetorial médio (EVM_{RMS}). Considerou-se a alocação dos 52 RBs para cada cenário avaliado e manteve-se a frequência da portadora 5G NR em 768 MHz e variou-se o espaçamento entre os sinais de 500 kHz a 14 MHz, alterando a frequência central do sinal LTE-A Pro. Na Figura 3-4 (a), exibe-se o resultado experimental em termos de EVM_{RMS} para a coexistência entre o sinal 5G NR com modulação QPSK e o LTE-A Pro. Atendeu-se aos pré-requisitos do 3GPP [88] para modulação QPSK ($EVM_{RMS} < 17,5\%$) para *offset* maior ou igual a 8,6 MHz, conforme indicado no ponto *a*. Para $d = 14$ MHz, obteve-se $EVM_{RMS} = 0,88\%$, ponto *b*. Nas Figura 3-4 (b) e Figura 3-4 (c), indicam-se a constelação e o espectro correspondente aos pontos *a* e *b*, respectivamente. Na constelação, têm-se os canais 5G NR, onde o sinal SSS correspondem aos pontos em azul, os sinais PBCH aos verdes e o canal PDSCH ao amarelo. Observa-se na constelação, Figura 3.4 (b) no ponto *b* uma dispersão nos símbolos em amplitude e fase ocasionado pela interferência entre as portadoras, que pode levar à erro na detecção do símbolo estimado pelo receptor, por outro lado, na Figura 3.4 (c) temos uma constelação bem definida com símbolos

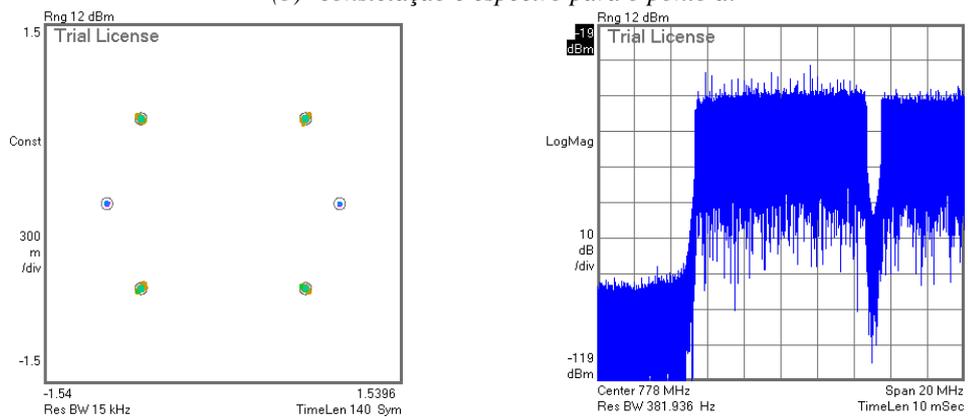
de controle e dados bem delineados em suas respectivas posições o que facilita a estimativa a recepção e demodulação.



(a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro.



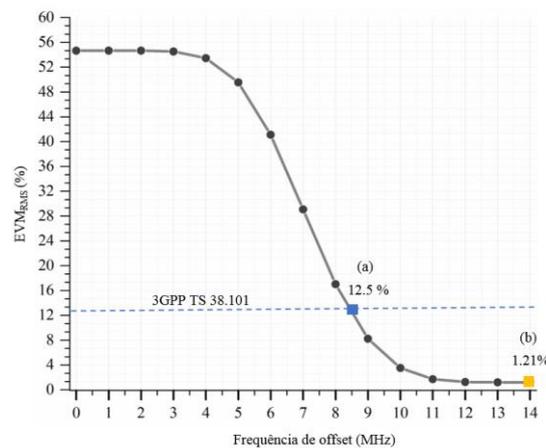
(b) constelação e espectro para o ponto a.



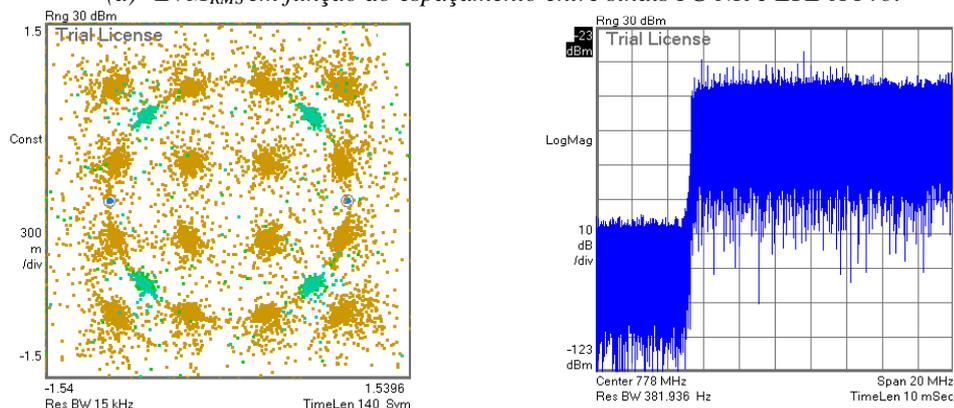
(c) constelação e espectro para o ponto b.

Figura 3-4 - Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação QPSK: (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a.; (c) constelação e espectro para o ponto b.

Na Figura 3-5, apresenta-se a análise experimental de coexistência em termos de EVM_{RMS} entre o sinal 64-QAM LTE-A Pro e o 5G NR com modulação 16-QAM. Deve-se manter um deslocamento mínimo de 8,6 MHz entre os sinais para atender aos pré-requisitos de EVM_{RMS} ($EVM_{RMS} < 12,5\%$) para a modulação 16-QAM [88]. No ponto *b*, tem-se $EVM_{RMS} = 1,21\%$, sendo esse valor superior ao encontrado para o cenário de coexistência com sinal 5G NR com modulação QPSK. Notam-se espaçamentos mínimos idênticos ($d = 8,6$ MHz) para as modulações QPSK e 16 QAM, para atender aos pré-requisitos do 3GPP em relação à EVM_{RMS} . Nas Figura 3-5 (b) e Figura 3-5 (c), indicam-se as constelações e espectro dos sinais para os pontos *a* e *b*. Para $d = 14$ MHz, obteve-se uma constelação bem definida se comparada a constelação do ponto *a*, sendo os resultados condizentes com os valores de EVM_{RMS} . Observa-se que na Figura 3.5 (b) uma distorção maior de fase nos símbolos da constelação quando se comparado com a Figura 3.4 (b), já na Figura 3.5 (c) temos um comportamento similar ao observado na Figura 3.4 (c) com símbolos bem delineados para uma ótima estimação e demodulação.



(a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro.



(b) constelação e espectro para o ponto *a*.

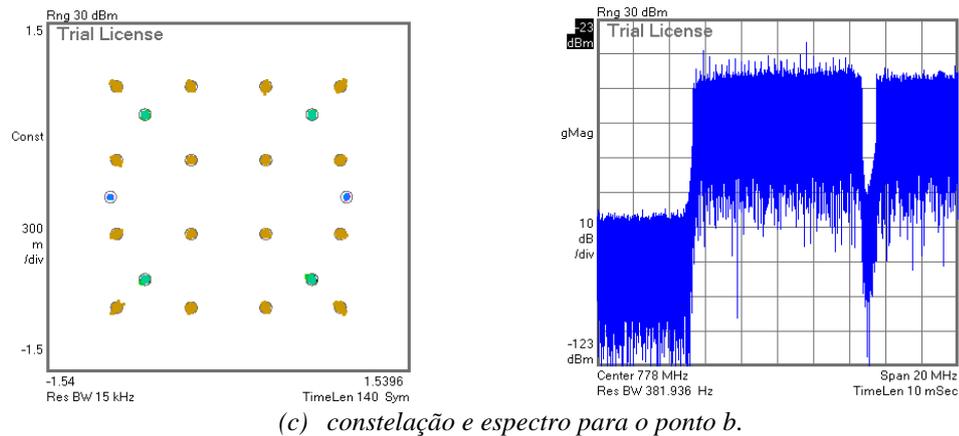


Figura 3-5 - Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação 16-QAM: (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a; (c) constelação e espectro para o ponto b.

Na Figura 3-6 ilustram-se os resultados da análise experimental de coexistência entre os sinais LTE-A Pro e o 5G NR, ambos utilizando a modulação 64-QAM. Observa-se um aumento no espaçamento mínimo para atender os pré-requisitos de EVM_{RMS} ($EVM_{RMS} < 8\%$ - modulação 64QAM), sendo esse valor igual a 9 MHz [88]. Nas Figura 3-6 (b) e Figura 3-6 (c), indicam-se as constelações e espectro dos sinais para os pontos destacados na Figura 3-6 (a). Para $d = 14$ MHz, obteve-se uma constelação bem definida se comparada ao ponto a e EVM_{RMS} de 0,825 %. Por fim, na Figura 3-7 apresenta a análise experimental de coexistência entre os sinais LTE-A Pro e o 5G NR utilizando a modulação 256-QAM. Obteve-se um maior espaçamento mínimo em relação às modulações supracitadas para o sinal 5G NR. Atendeu-se aos pré-requisitos estabelecidos pelo 3GPP para a modulação 256-QAM ($EVM_{RMS} < 3,5\%$) para $d = 9,4$ MHz [88]. As Figura 3-7 (a) e Figura 3-7 (b) apresentam as constelações e espectros para os pontos a e b, respectivamente.

Em suma, os resultados experimentais de coexistência entre os sinais LTE-A Pro e o 5G NR demonstraram que modulações de ordem superior exigem um espaçamento mínimo entre portadoras maior para satisfazer os pré-requisitos de EVM_{RMS} estabelecidos pelo 3GPP. Assim como esperado, visto que um aumento na ordem da modulação, implica em um aumento da SNR mínima para manter o desempenho do sistema. Todavia, para espaçamentos iguais ou superiores a 11 MHz obteve-se EVM_{RMS} inferior a 2% para todas as modulações consideradas. Portanto, conclui-se que é possível a coexistência pacífica entre sinais LTE-A Pro e 5G NR em 700 MHz

desde que o *offset* de 9,4 MHz seja respeitado para tender os pré-requisitos mínimos do 3GPP e para um ótimo desempenho tenha-se um *offset* de 14 MHz para um melhor resultado de EVM_{RMS} .

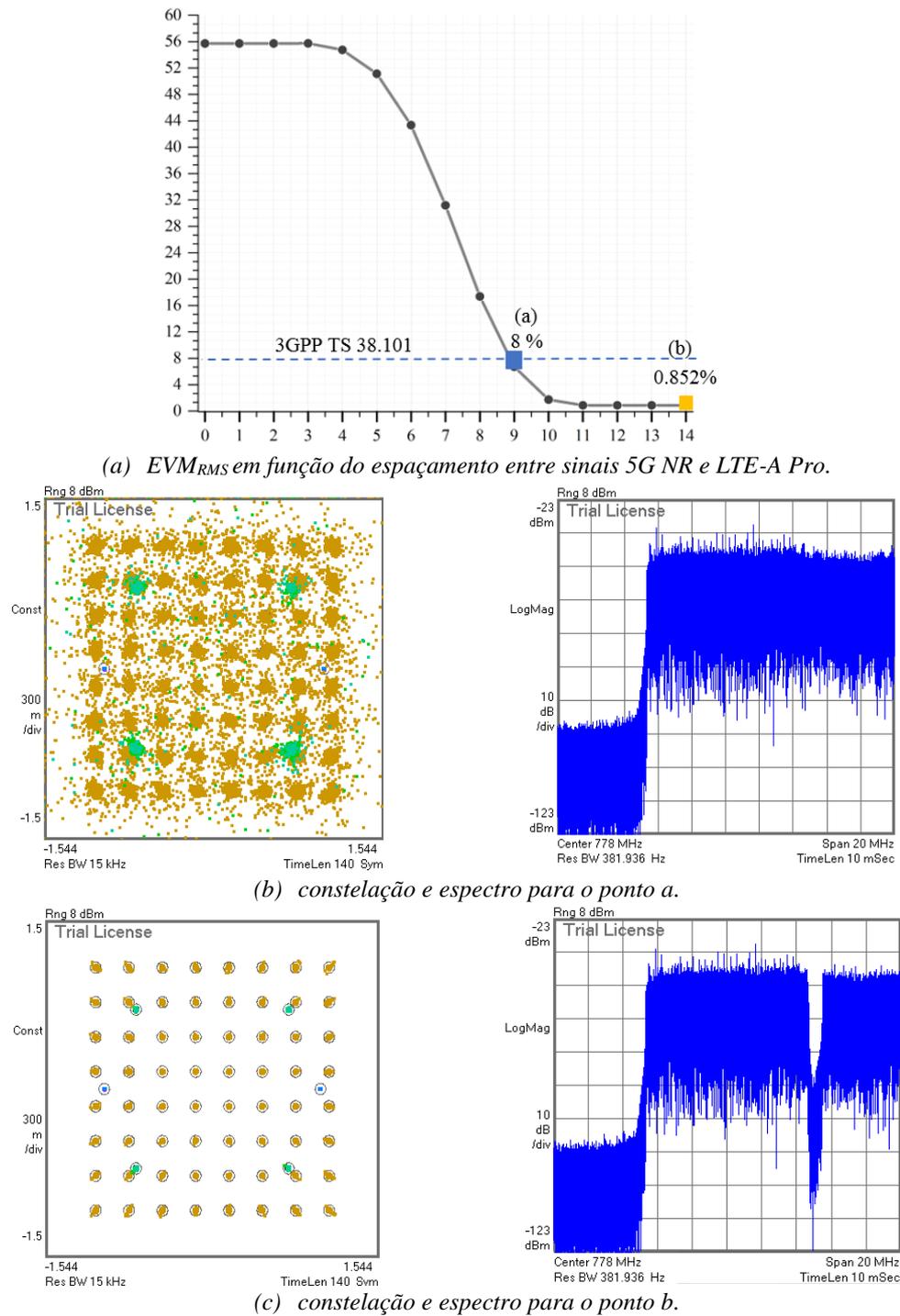
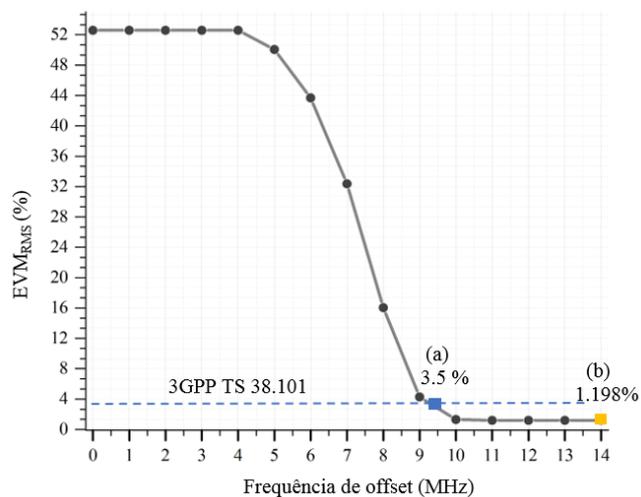
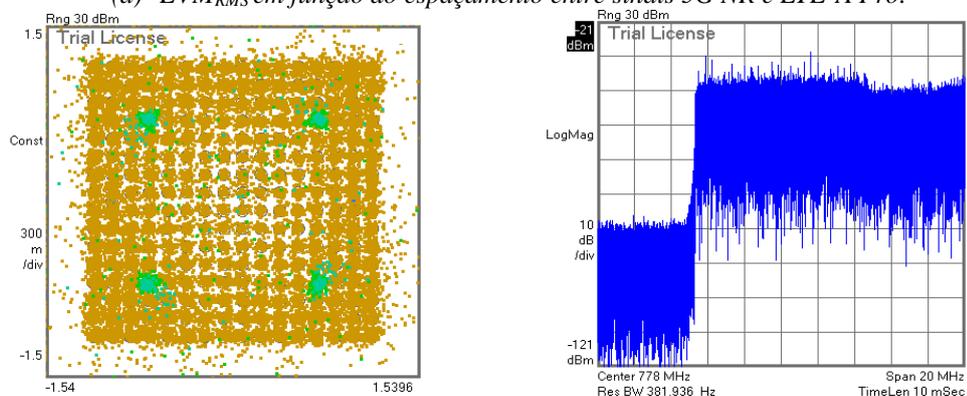


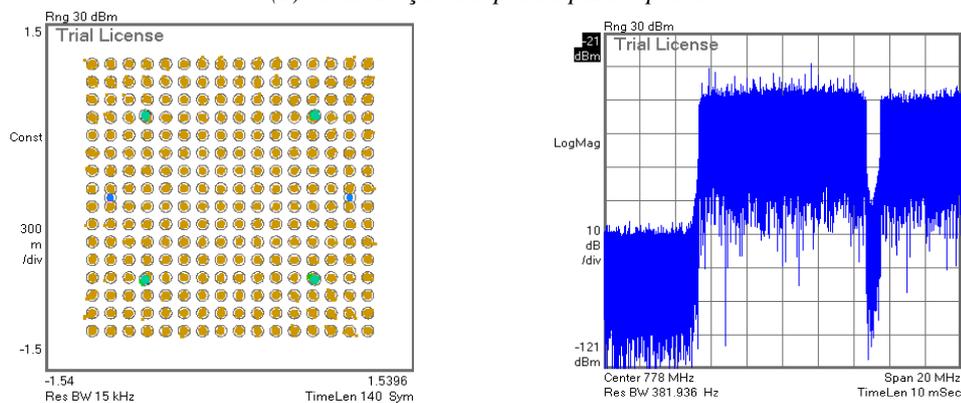
Figura 3-6 – Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação 64 QAM : (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a; (c) constelação e espectro para o ponto b.



(a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro.



(b) constelação e espectro para o ponto a.



(c) constelação e espectro para o ponto b.

Figura 3-7 – Análise experimental de coexistência entre LTE-A Pro e 5G NR com modulação 256 QAM: (a) EVM_{RMS} em função do espaçamento entre sinais 5G NR e LTE-A Pro; (b) constelação e espectro para o ponto a; (c) constelação e espectro para o ponto b.

3.3 Coexistência de *downlink* co-canal

A coexistência co-canal é um dos cenários mais desafiadores envolvendo compartilhamento de espectro entre duas diferentes gerações de telefonia celular. Na Figura 3-8, ilustra a estratégia utilizada para análise de coexistência co-canal entre o

LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR na banda de 700 MHz. Um canal de 10 MHz de largura de banda é compartilhado por uma portadora 5G NR, uma LTE-A Pro e três NB-IoT. Avaliaram-se as portadoras NB-IoT em dois modos de operação: duas portadoras no modo de intervalo de guarda e uma em modo autônomo, localizada no centro do espectro e entre o espaçamento das portadoras 5G NR e LTE-A Pro.

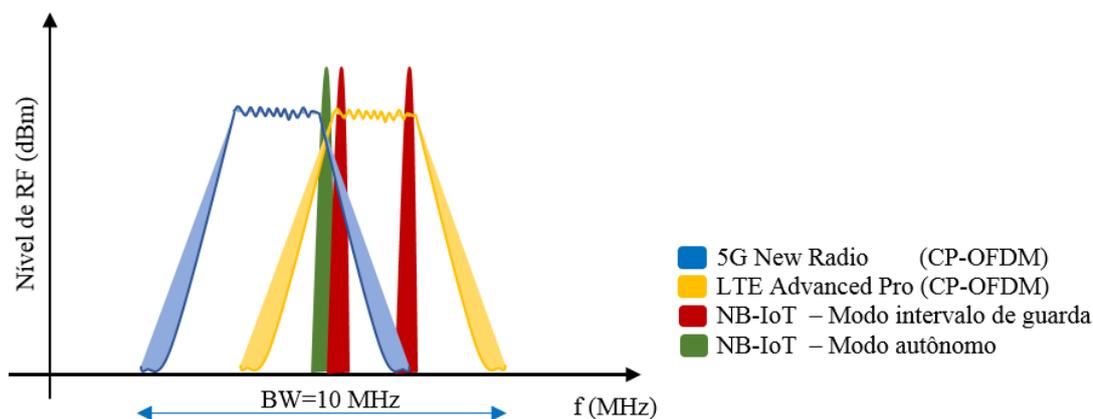


Figura 3-8 – Ilustração da análise de coexistência co-canal entre 5G NR, LTE-A Pro e NB-IoT na banda de 700 MHz.

A tecnologia 5G NR tem como princípio o “*ultra-lean design*” [68], no qual o sinal “*always-on*” (sempre presente) é minimizado em contraste com a tecnologia LTE, por isso o sinal é irradiado apenas quando, dados são transmitidos. Pode-se configurar e alocar recursos no tempo e frequência utilizando o recurso CORESET do padrão 5G NR [68]. O CORESET permite a alocação de sinais de sincronização, controle e dados em subportadoras OFDM em tempo e frequência, visando evitar colisões e minimizar possíveis interferências entre portadoras LTE-A Pro e 5G NR. Na Figura 3-9 exemplificam-se duas configurações de “bitmaps” no tempo e em frequência permitindo uma alocação de recursos 5G NR no tempo e frequência.

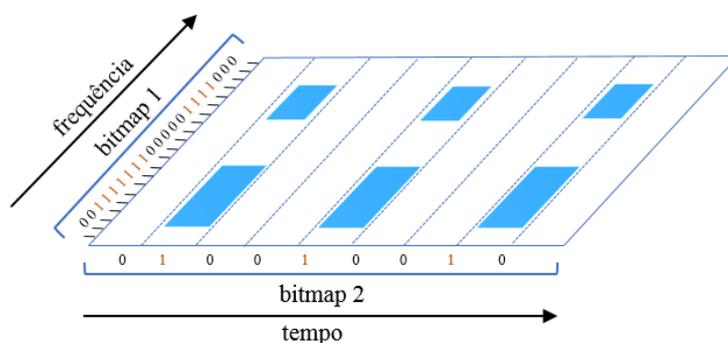
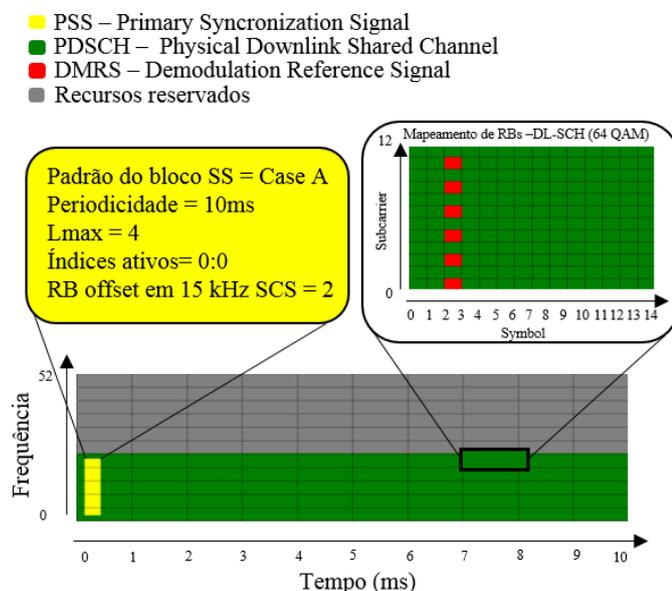
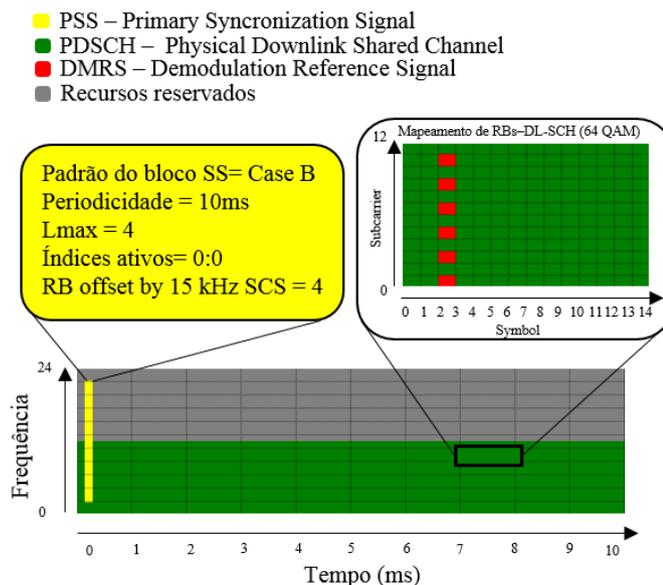


Figura 3-9 – Exemplo de alocação de recursos no tempo e frequência usando o CORESET [14].

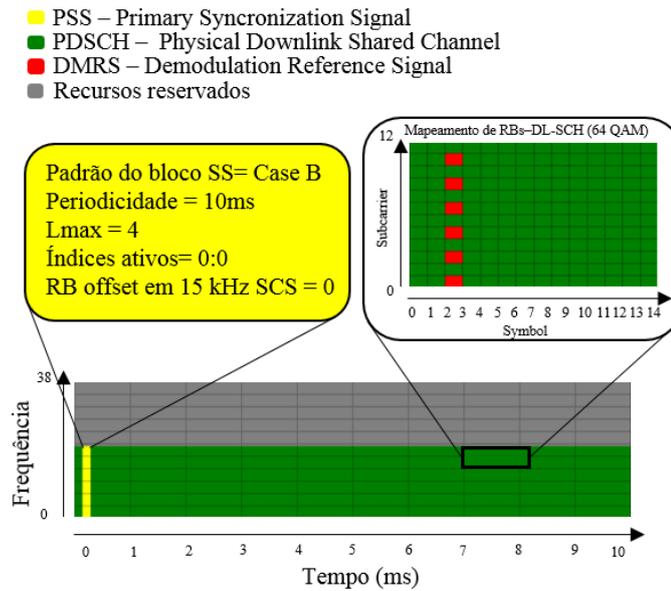
O espaçamento de subportadoras do 5G NR precisa estar configurado em 15 kHz para evitar sobreposição com o LTE-A Pro. Observa-se na Figura 3-10 (a), a alocação de recursos no tempo e frequência. Configurou-se o sinal PSS com um índice ativo e intervalo de 10 ms entre as transmissões (Caso A) e o PDSCH para uso de 240 RBs. Desligou-se os RBs remanescentes usando o CORESET para permitir a alocação neste espaço da portadora LTE-A Pro e NB-IoT.



(a) espaçamento de subportadora de 15 kHz em um canal de 10 MHz.



(b) espaçamento de subportadora de 30 kHz em um canal de 10 MHz.



(c) para 30 kHz de espaçamento de subportadora em um canal de 15 MHz.

Figura 3-10 – Alocação de recursos no tempo e frequência do 5G NR utilizando o CORESET: (a) espaçamento de subportadora de 15 kHz em um canal de 10 MHz; (b) espaçamento de subportadora de 30 kHz em um canal de 10 MHz; (c) para 30 kHz de espaçamento de subportadora em um canal de 15 MHz.

Caso escolha-se espaçamento de 30 kHz, o sinal de sincronismo PSS irá alocar aproximadamente todas as subportadoras OFDM disponíveis em um canal de 10 MHz, conforme visto na Figura 3-10 (b). Consequentemente, colisões e interferências podem ocorrer, pois o tamanho mínimo do PSS é igual a quatro. Ainda que se ajuste um “offset” de localização do RB referente ao PSS, tem-se uma alocação de frequência completa do canal de 10 MHz, inviabilizando a coexistência. Para se utilizar a numerologia de 30 kHz em um cenário de coexistência co-canal, necessita-se de um canal disponível com no mínimo 15 MHz para a alocação de sinais de PSS e desligamento de subportadoras (Figura 3-10 (c)), tornando a coexistência factível.

Na Figura 3-11, apresentam-se o espectro e a constelação de um sinal 5G NR configurado por meio do CORESET. Na constelação, tem-se os canais lógicos PSS em modulação BPSK (pontos azuis), PBCH em QPSK (pontos verdes) e PDSCH em 64 QAM (pontos amarelos). O canal está configurado em 10 MHz, porém ativou-se somente o sinal 5G NR. A Tabela 3.1 -, reporta o desempenho em termos EVM_{RMS} para os sinais de controle e de dados 5G NR demodulados. Os seguintes canais foram avaliados: PSS, SSS, PBCH, *physical broadcast demodulation reference signal* (PBCH DMRS), PSDCH, *physical data shared channel for demodulation reference*

signal (PDSCH DMRS) e *physical data shared channel for phase tracking reference signal* (PDSCH PTRS). Atendeu-se os pré-requisitos EVM_{RMS} do 3GPP para todos os sinais analisados, com excelentes valores de EVM_{RMS} entre 0,317 a 0,419 %. Observa-se que a constelação apresentada na Figura 3.11 tem os símbolos de dados em amarelo e controle em verde, bem delineados em suas respectivas posições cartesianas para uma perfeita detecção no processo de recepção, resultante de um EVM_{RMS} baixo conforme observado na Tabela 3.1.

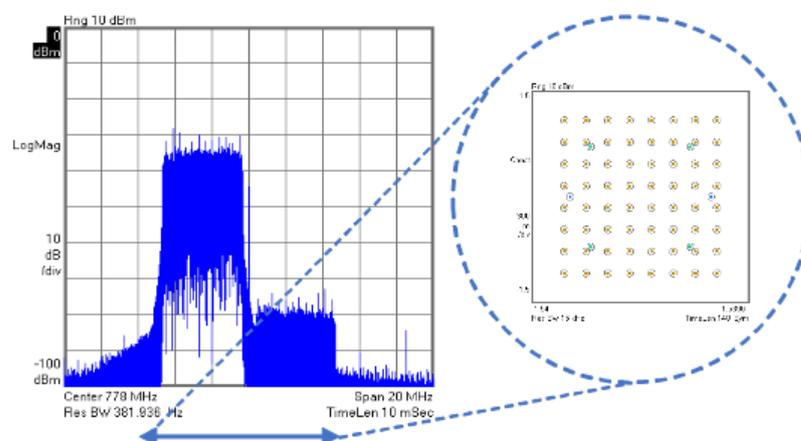


Figura 3-11 – Espectro 5G NR e constelação, configurados utilizando o CORESET.

Tabela 3.1 - Análise de performance de demodulação dos sinais e canais do 5G NR.

Canal	EVM_{RMS}	Modulação	Nº de Blocos de Recursos
PSS	0,317 %	BPSK	12
SSS	0,358 %	BPSK	12
PBCH	0,373 %	QPSK	20
PBCH DMRS	0,339 %	QPSK	19
PDSCH	0,438 %	64 QAM	240
PDSCH DMRS	0,433 %	QPSK	219
PDSCH PTRS	0,419 %	QPSK	120

A Figura 3-12 ilustra o mapeamento de recursos do LTE-A Pro e NB- IoT. Para o LTE-A Pro, utilizou-se um canal padrão de 5 MHz e configurou-se um sinal com alocação de 25 RBs, centrado na frequência de 781 MHz e com espaçamento fixo de 15 kHz entre subportadoras OFDM. Ressalta-se que os sinais de referência CRS do LTE não podem ser desligados, sendo caracterizados como “*always-on*” [68]. Para o NB-IoT, utilizou-se a modulação QPSK, sendo as portadoras alocadas para o canal NPDSCH. Centralizou-se as portadoras NB-IoT em frequências distintas dentro do canal de 10 MHz: *Cell ID 1* em 778,6525 MHz, *Cell ID 2* em 778,6525 MHz e *Cell ID 3* em 783,3475 MHz.

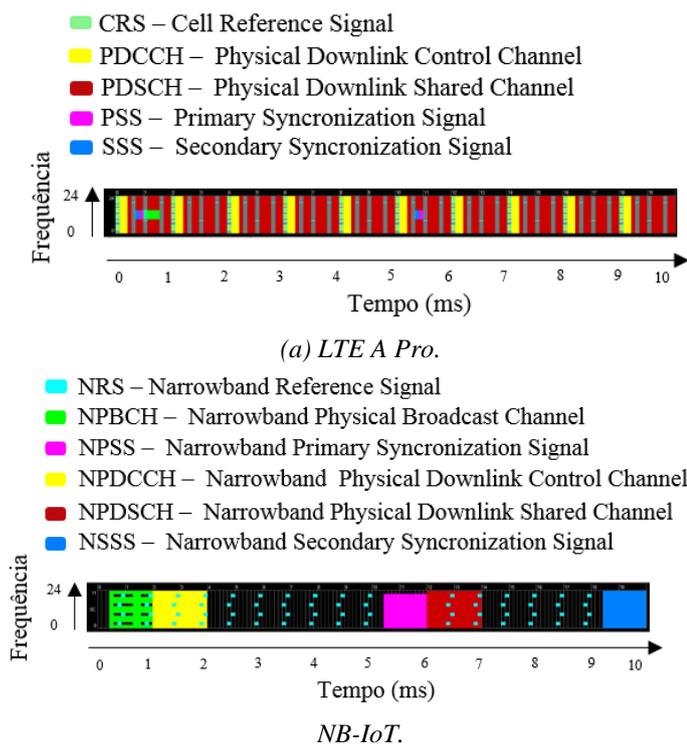
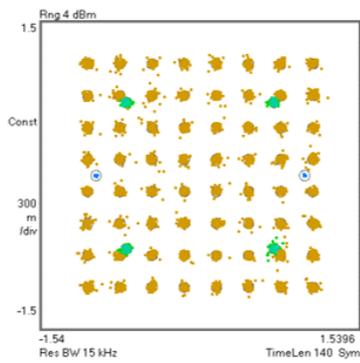
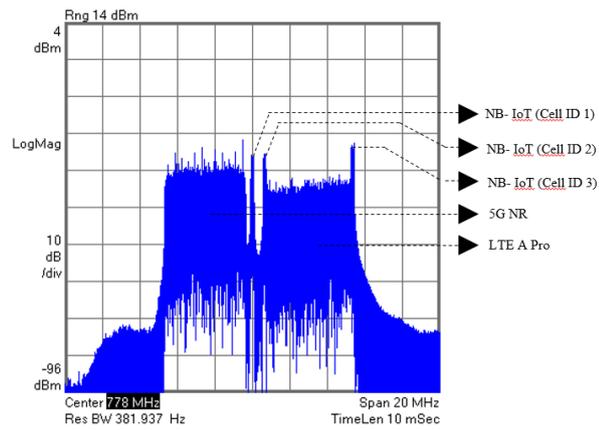
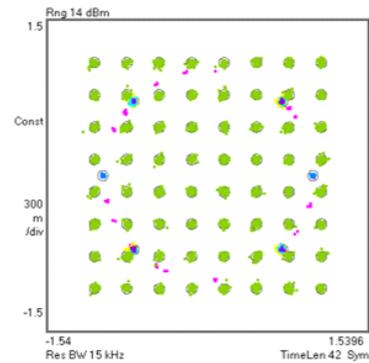


Figura 3-12 – Mapeamento de recursos para o LTE A Pro e NB-IoT.

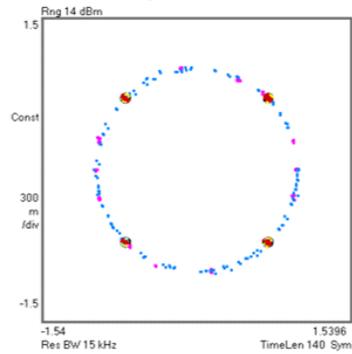
O espectro do canal de 10 MHz compartilhado entre o LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR e suas respectivas constelações demoduladas são apresentados na Figura 3.13. Na Tabela 3.2, indicam-se o EVM_{RMS} , modulação e número de RBs alocados para cada tecnologia, discriminando os canais de controle e de dados. Obteve-se um excelente desempenho em termos de EVM_{RMS} , cujos valores variam entre 0,579 a 1,945%, atendendo a todos os pré-requisitos do 3GPP para os formatos de modulações avaliados. Particularmente, para o 5G NR tem-se um EVM_{RMS} variando de 0,579% (PSS utilizando BPSK) até 1,827% (PDSCH PRTS com QPSK e 120 RBs). A portadora LTE-A Pro apresentou um ótimo desempenho com EVM_{RMS} variando de 1,214% (PSS com modulação Z-Chu e 7 RBs) até 1,945 % (PDSCH com modulação 64-QAM e 150 RBs). Para o NB-IoT, o sinal NPSS apresentou um EVM_{RMS} máximo de 1,845%, o NPBCH 1,905% e o NPDSCH 1,742% utilizando a modulação QPSK para baixa transmissão de dados entre dispositivos. Observa-se nas constelações a baixa distorção e ausência de rotação dos símbolos resultantes de um baixo ruído de fase adicionado pelo transmissor e pelo canal, por outro lado temos um acréscimo de ruído nos símbolos adicionado pela elevação do patamar de ruído resultante da emissão fora da faixa já conhecida do OFDM, resultando na degradação do EVM_{RMS} .



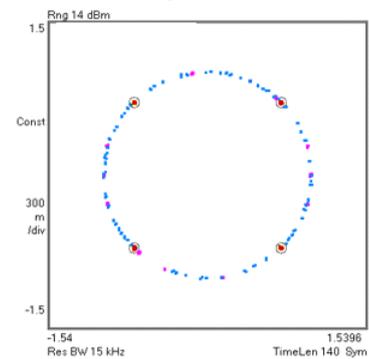
(a) constelação do sinal 5G NR.



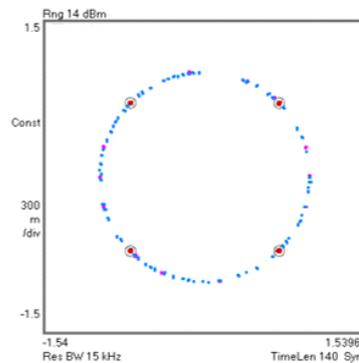
(b) constelação do LTE A Pro.



(c) constelação do NB-IoT em modo autônomo – Cell Id 1.



(d) constelação do NB-IoT modo intervalo de guarda – Cell Id 2.



e) constelação do NB-IoT modo intervalo de guarda – Cell Id 3.

Figura 3-13 – Espectro do canal de 10 MHz compartilhado entre o LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR e constelações demoduladas: (a) constelação do sinal 5G NR; (b) constelação do LTE A Pro; (c) constelação do NB-IoT em modo autônomo – Cell Id 1; (d) constelação do NB-IoT modo intervalo de guarda – Cell Id 2; (e) constelação do NB-IoT modo intervalo de guarda – Cell Id 3.

Tabela 3.2 – Desempenho em termos de EVM_{RMS} dos canais de controle e de dados para o cenário de coexistência co-canal entre LTE-A Pro, NB-IoT e 5G NR.

Canais de controle e de dados para o 5G NR			
Canal	EVM_{RMS}	Modulação	Nº de Blocos de Recursos
PSS	0,579 %	BPSK	12
SSS	0,560 %	BPSK	12
PBCH	0,905 %	QPSK	20
PBCH DMRS	0,620 %	QPSK	19
PDSCH	1,748 %	64 QAM	240
PDSCH DMRS	1,339 %	QPSK	219
PDSCH PTRS	1,827 %	QPSK	120
Canais de controle e de dados para o LTE-A Pro			
Canal	EVM_{RMS}	Modulação	Nº de Blocos de Recursos
P-SS	1,214 %	Z-Chu	7
S-SS	1,325 %	BPSK	7
PBCH	1,846 %	QPSK	7
PDCCH	1,717 %	QPSK	75
C-RS	1,585 %	QPSK	150
PDSCH	1,945 %	64QAM	150
Canais de controle e de dados do NB-IoT (Cell ID=1)			
Canal	EVM_{RMS}	Modulação	Nº de Blocos de Recursos
NPSS	1,845 %	Z-Chu	2
NSSS	1,762 %	Z-Chu	2
NPBCH	1,905 %	QPSK	2
NPDCCH	1,776 %	QPSK	2
NRS	1,099 %	QPSK	16
NPDSCH	1,742 %	QPSK	2
Canais de controle e de dados do NB-IoT (Cell ID=2)			
Canal	EVM_{RMS}	Modulação	Nº de Blocos de Recursos
NPSS	0,941 %	Z-Chu	2
NSSS	1,011 %	Z-Chu	2
NPBCH	0,845 %	QPSK	2
NPDCCH	0,984 %	QPSK	2
NRS	0,695 %	QPSK	16
NPDSCH	0,806 %	QPSK	2
Canais de controle e de dados do NB-IoT (Cell ID=3)			
Canal	EVM_{RMS}	Modulação	Nº de Blocos de Recursos
NPSS	0,862 %	Z-Chu	2
NSSS	0,839 %	Z-Chu	2
NPBCH	0,881 %	QPSK	2
NPDCCH	0,648 %	QPSK	2
NRS	0,622 %	QPSK	16
NPDSCH	0,903 %	QPSK	2

3.4 *Walk Test* em canal adjacente

Na Seção 3.2, avaliou-se a coexistência em canais adjacentes em função de EVM_{RMS} para encontrar o menor espaçamento entre portadoras 5G NR e LTE A Pro que satisfizesse os pré-requisitos estabelecidos pelo 3GPP. Esta seção, apresenta os resultados de desempenho em termos de KPI (*Key Performance Indicator*) da nossa rede 5G NR em comparação com a rede da operadora TIM que opera na faixa de 700 MHz na cidade de Santa Rita do Sapucaí-MG. Para o experimento, utilizou-se o equipamento escâner modelo TSMA6 da fabricante alemã Rohde & Schwarz, (Figura 3-14). Esse equipamento opera entre 350 MHz a 6 GHz e analisa paralelamente todas as tecnologias de comunicação celular 4G e 5G presentes nesta faixa. Obtiveram-se os parâmetros de desempenho da rede utilizando o software *ROMES*^{®4} da mesma empresa.



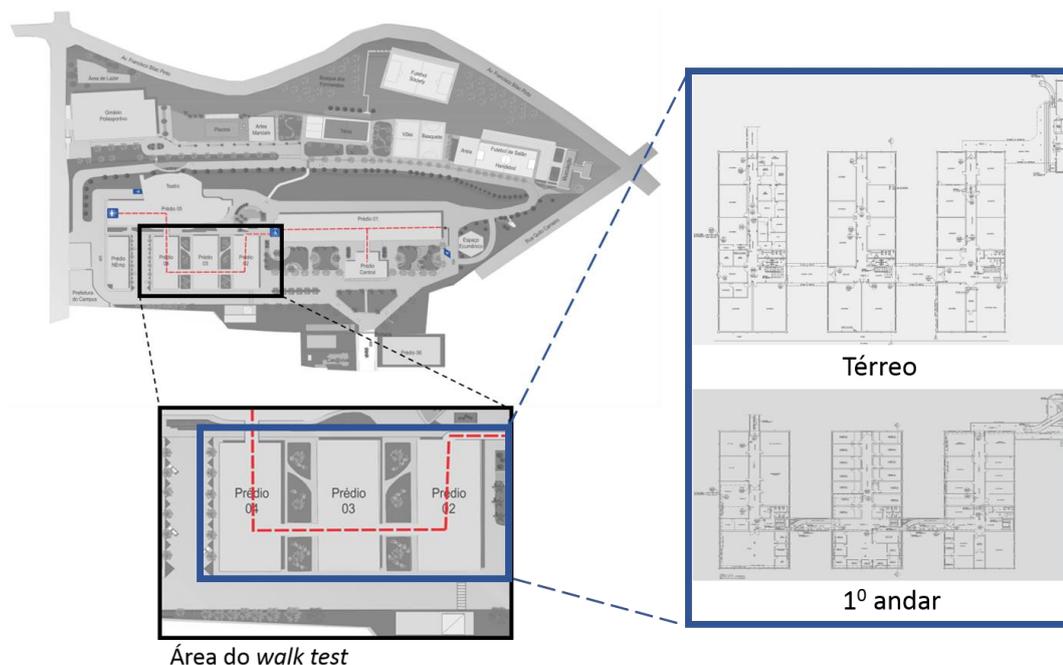
Figura 3-14 – Escâner TSMA6 da empresa Rohde & Schwarz.

Para simulação de uma gNodeB, utilizou-se um gerador SMBV100A (Figura 3-15), também da Rohde & Schwarz. Fixou-se a potência de transmissão do sinal 5G NR em 18 dBm. Na transmissão, empregou-se a mesma antena log-periódica dos experimentos anteriores com ganho de 5 dBi.



Figura 3-15 – Gerador de sinais 5G NR: modelo SMBV100A da empresa Rohde & Schwarz.

Realizou-se o *walk test* nos Prédios 2, 3 e 4, do Inatel em ambiente interno, corredores e salas do primeiro e segundo pavimento (térreo e 1º andar). Os testes em ambiente externo concentraram-se nas proximidades dos prédios e os seus acessos. A Figura 3-16, apresenta os ambientes e equipamentos utilizados no *walk test*.



(a) planta baixa dos Prédios 2, 3, 4 do Inatel com destaque para a área de realização do walk test.



(b) gerador de sinais 5G NR e equipamentos do walk test na banda de 700 MHz.

Figura 3-16 – Ambientes e equipamentos para o walk test: (a) planta baixa dos Prédios 2, 3, 4 do Inatel com destaque para a área de realização do walk test; (b) gerador de sinais 5G NR e equipamentos do walk test na banda de 700 MHz instalados no Prédio 02 (Térreo).

Inicialmente, verificaram-se todos os sinais LTE presentes na banda de 700 MHz para determinar a frequência de configuração do gerador 5G NR. De maneira a não causar interferências nas redes comerciais. Identificou-se a portadora de

downlink da operadora TIM na frequência de 778 MHz e uma portadora NB-IoT na frequência de 773,4025 MHz configurada no modo de intervalo de guarda do sinal LTE. Na Figura 3-17, tem-se a identificação dos sinais utilizando o modo *Automatic Channel Detector* do escâner TSMA6.

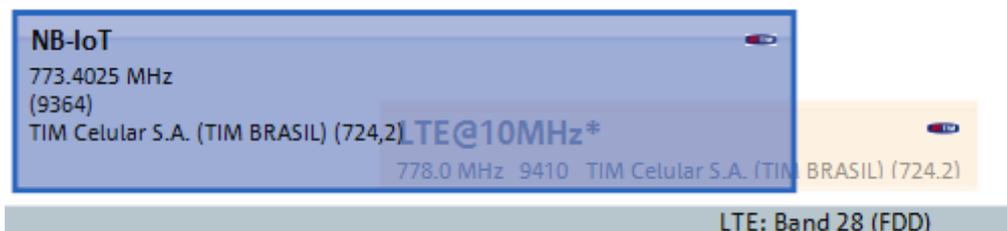
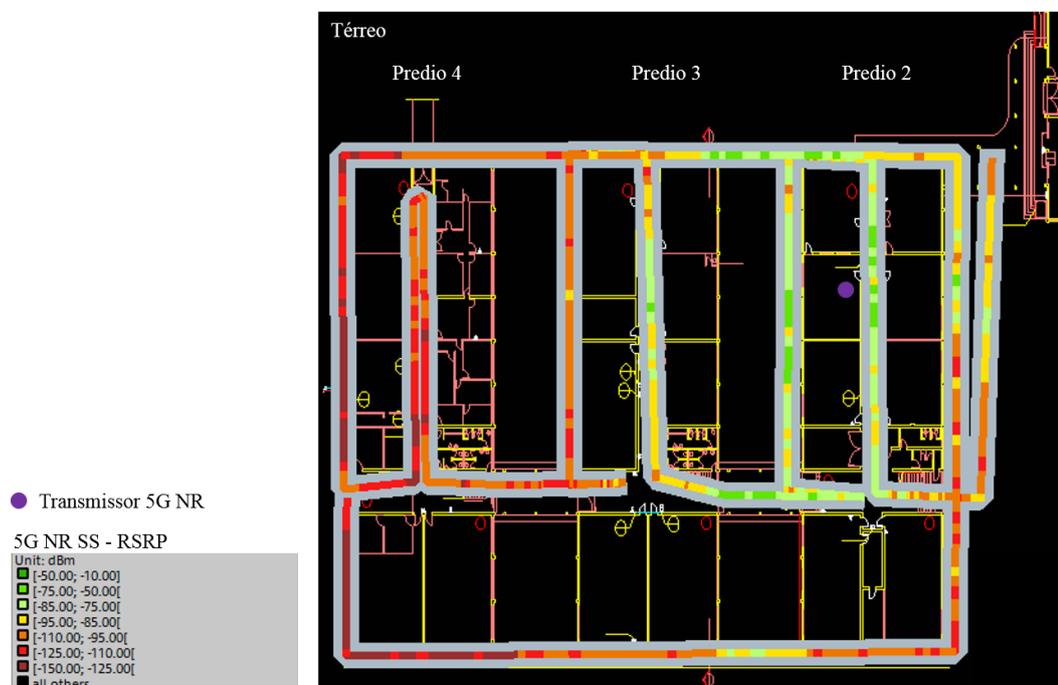


Figura 3-17 – Detecção das tecnologias 4G na banda de 700 MHz.

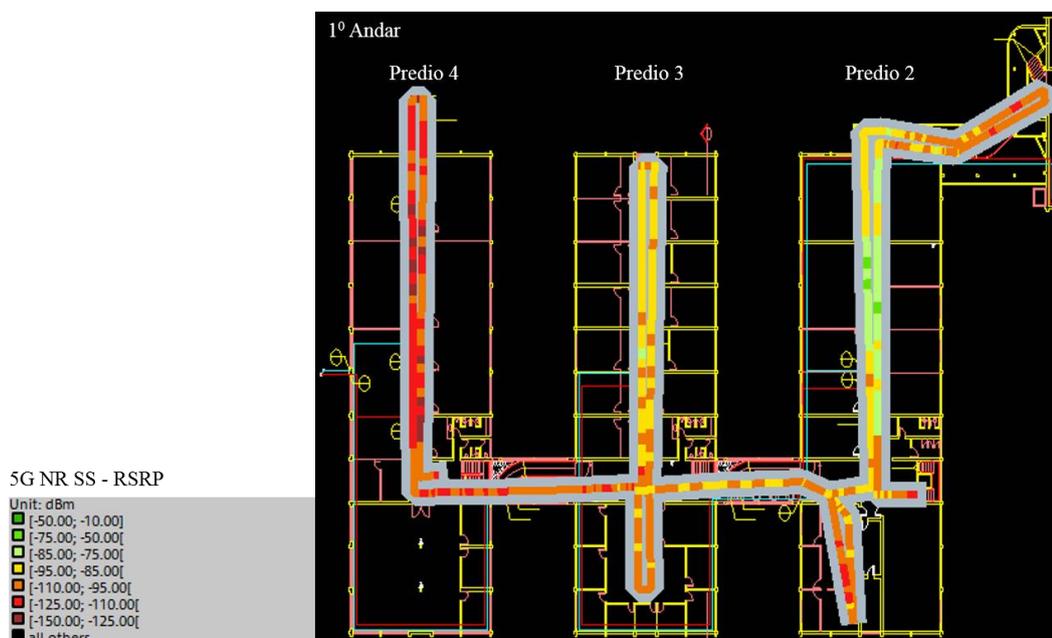
Identificado o sinal LTE, delimitou-se o cenário para análise com espaçamento entre portadoras 4G e 5G em 9,4 MHz, sendo esse valor o espaçamento mínimo encontrado em testes de coexistência apresentados na seção anterior. Analisou-se o desempenho de cobertura do sinal 5G NR e mediu-se o sinal de sincronismo SS da portadora de 10 MHz transmitida. Comparou-se o sinal recebido de cada setor para avaliar os níveis mínimos de radiofrequência por área para demodulação do sinal 5G NR e *handover* entre células. Avaliando-se o parâmetro *Synchronization Signal Reference Signal Received Power* (SS-RSRP). O sinal SS-RSRP é definido como a média linear da contribuição de potência dos elementos que transportam o sinal SSS, sendo equivalente ao sinal RSRP no LTE-A Pro [68, 91]. O dispositivo móvel inicia a detecção da célula após o nível de SS-RSRP estar acima do parâmetro configurado em *rsrp-ThresholdSSB* [89, 91]. Este parâmetro delimita o menor nível de SS-RSRP aceito para uma correta detecção do 5G NR. A sensibilidade de recepção do escâner TSMA6 para sinais de sincronismo 5G NR configurados com 10 ms de intervalo e espaçamento de 15 kHz entre subportadoras é de -150 dBm para a faixa de frequência de análise [92]. Os parâmetros de RSRP mínimos aceitáveis dependem de requisitos mínimos do serviço em oferta. Para este trabalho, considerou-se um limite máximo de SS-RSRP de -120 dBm, sendo o valor especificado para os dispositivos móveis 5G NR comerciais [93]. Valores inferiores a -120 dBm colaboram para possíveis quedas de serviço devido à baixa relação sinal ruído do sinal de sincronismo.

A Figura 3-18 ilustra os resultados da medição do sinal SS-RSRP para o ambiente descrito na Figura 3-16 (a). Verifica-se uma ótima cobertura para os prédios

2 e 3, com SS-RSRP variando de -50 à -110 dBm. Para o prédio 4 esse parâmetro esteve entre -110 e -125 dBm. Em alguns pontos o equipamento auferiu valores próximos de -150 dBm.



(a) medição do SS-RSRP 5G NR para o térreo.



(b) medição do SS-RSRP 5G NR para o 1º andar.

Figura 3-18 – Resultado do walk test – 5G NR SS-RSRP: (a) medição do SS-RSRP 5G NR para o térreo; (b) medição do SS-RSRP 5G NR para o 1º andar.

O parâmetro *Synchronization signal signal-to-noise and interference ratio* (SS-SINR) é definido como a média linear da potência dos elementos que transportam o sinal SSS dividido pela média linear da potência do ruído mais interferência da potência dos recursos e transportam o SSS na mesma banda de frequência [91]. O sinal SS-SINR possui uma faixa de medição entre 40 e -23 dB, onde valores maiores que 20 dB são considerados excelentes e valores inferiores a 0 dB delimitam a condição extrema de relação SINR. Nas Figura 3-19 (a) e Figura 3-19 (b), indicam-se as medições, em que os valores são superiores a 5 dB para uma grande parte das áreas. Isso ocorre devido à falta de um sinal interferente na região do experimento. Em alguns pontos em áreas externas ao prédio 4, o nível de SS-RSRP medido está próximo do limiar de detecção do TSMA6 e o SS-SINR ficou abaixo de 0 dB.

Por fim, foi realizada a medição do sinal *Secondary synchronization reference signal received quality* (SS-RSRQ), cujo cálculo é dado por [91]:

$$SS - RSRQ = \frac{N \times SS - RSRP}{NR_{portadora} RSSI} \quad (3.1)$$

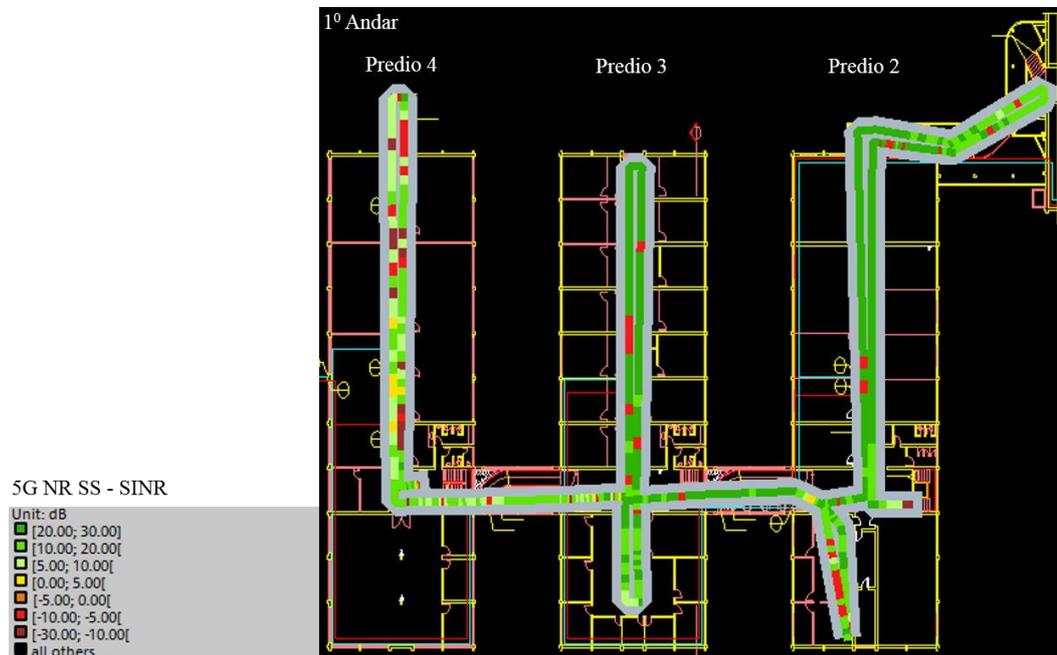
sendo N o número de blocos de recursos que a portadora 5G NR possui em uma medida de *received signal strength indicator* (RSSI) na largura de banda do sinal em análise. O SS-RSRQ indica a qualidade do sinal de referência SS recebido do sinal 5G NR. Além disso, o SS-RSRQ provê informações adicionais de qualidade do sinal quando o SS-RSRP não é suficiente para ser utilizado como sinal de decisão para um processo de *handover*. Nas Figura 3-20 (a) e Figura 3-20 (b), mostram-se as medidas do sinal SS-RSRQ para o 5G NR.

O sinal SS-RSRQ tem uma faixa de medição com valores ótimos medidos acima de > -20 dB e valores referentes a baixa qualidade do sinal com níveis abaixo de -20 dB. Pode-se observar nas medições realizadas uma qualidade de sinal média entre -15 e -10 dB, caracterizado como um sinal com boa qualidade. Pontos em vermelho, onde a medição apontou níveis abaixo de -20 dB se deram devido à baixa relação sinal ruído do sinal SS-RSRP medido e apresentado na Figura 3.18 (a) e Figura 3.18 (b). Apresentaram-se medições de parâmetros de desempenho de rede 5G NR com ótimos resultados para uma distância mínima de portadoras de 9,4 MHz, considerada uma

distância limítrofe para uma coexistência em canal adjacente entre os sinais 5G NR e LTE-A Pro.



(a) medição do SS-SINR 5G NR para o térreo.

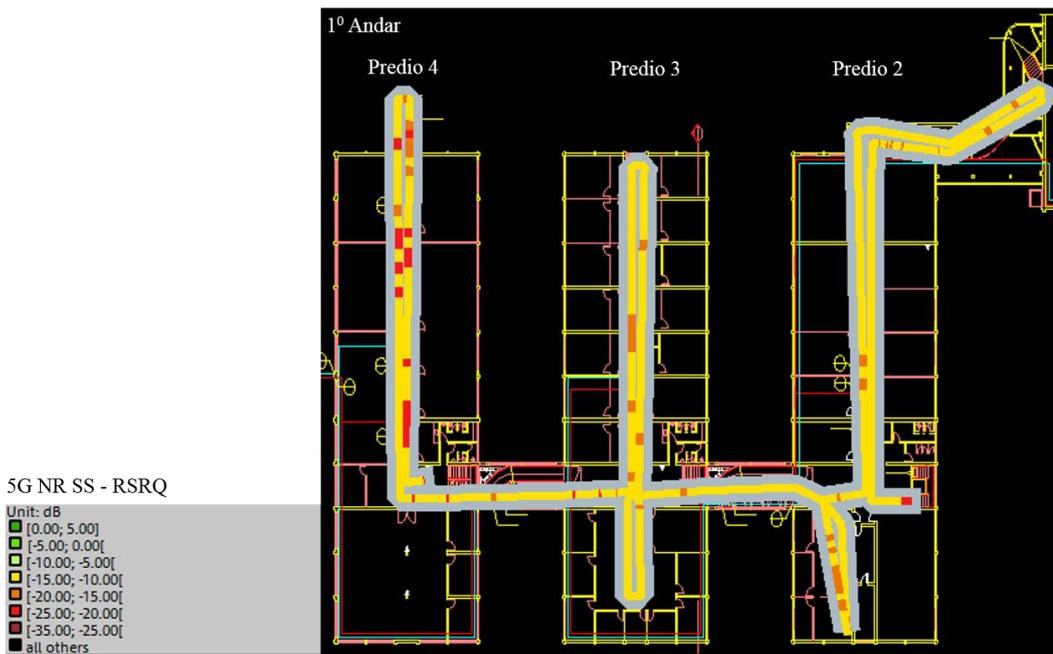


(b) medição do SS-SINR 5G NR para o 1º andar.

Figura 3-19- Resultado do walk test – 5G NR SS-SINR: (a) medição do SS-SINR 5G NR para o térreo; (b) medição do SS-SINR 5G NR para o 1º andar.



(a) medição do SS-RSRQ 5G NR para o térreo.



(b) medição do SS-RSRQ 5G NR para o 1º andar.

Figura 3-20- Resultado do walk test – 5G NR SS-RSRQ: (a) medição do SS-RSRQ 5G NR para o térreo; (b) medição do SS-RSRQ 5G NR para o 1º andar.

Capítulo 4

4. Coexistência entre 5G NR e TVRO na Banda C

Existem aproximadamente 22 milhões de residências que utilizam o sistema TVRO no Brasil segundo a pesquisa nacional de amostra por domicílios (PNAD) e 120 milhões de residências nos Estados Unidos que utilizam a banda C para receber conteúdo de vídeo e rádio (Fonte: *Federal Communication Commission* (FCC)). Em ambos os países, utilizam-se satélites operando na Banda C. A prospecção de operação do 5G nessa porção do espectro pode ocasionar cenários de interferência dado a coexistência entre essas tecnologias. Nesse contexto, abordam-se os resultados experimentais que demonstram a interferência do 5G NR operando em 3,47 GHz com largura de faixa de 100 MHz em sistemas TVRO operando de 3,625 GHz à 4,2 GHz, discutem-se e implementam-se propostas para mitigar esse efeito.

4.1. Cenários de testes

Os testes de coexistências entre o sinal 5G NR e o sistema TVRO foram realizados em dois diferentes cenários. A Figura 4-1, ilustra o primeiro arranjo experimental no qual utiliza-se um gerador 5G NR (SMBV100A) da fabricante Rohde & Schwarz. O SMVB100A gera um sinal padrão 5G NR, com 100 MHz de largura de faixa e centrado na frequência de 3,55 GHz. Irradiou-se o sinal 5G NR utilizando uma antena log-periódica do Capítulo 3. Na recepção, montou-se uma estação terrestre de recepção TVRO composta por uma antena parabólica de refletor sólido com 1,7 metros de diâmetro e um LNBF de 65 dB de ganho. Esta estação foi instalada no campus do Inatel que possui coordenadas geográficas: - 22,25780 (latitude) e -

45,69570 (longitude). Apontou-se o sistema de recepção para o Satélite Embratel Star One C2, que ocupa a posição orbital 70° W, para recepção dos canais de TV. Conectou-se uma saída diretamente ao receptor TVRO e a outra a um analisador de espectro (SA124B) da fabricante Signal Hound modelo SA124B. Analisou-se o desempenho de saturação e distorção do espectro de frequência intermediária na presença do sinal 5G NR em diferentes níveis de potência recebidos pelo conjunto. Simultaneamente, utilizou-se um analisador de espectro (FieldFox N9912A), da fabricante Keysight, para monitorar os níveis de potência do sinal 5G NR recebido.

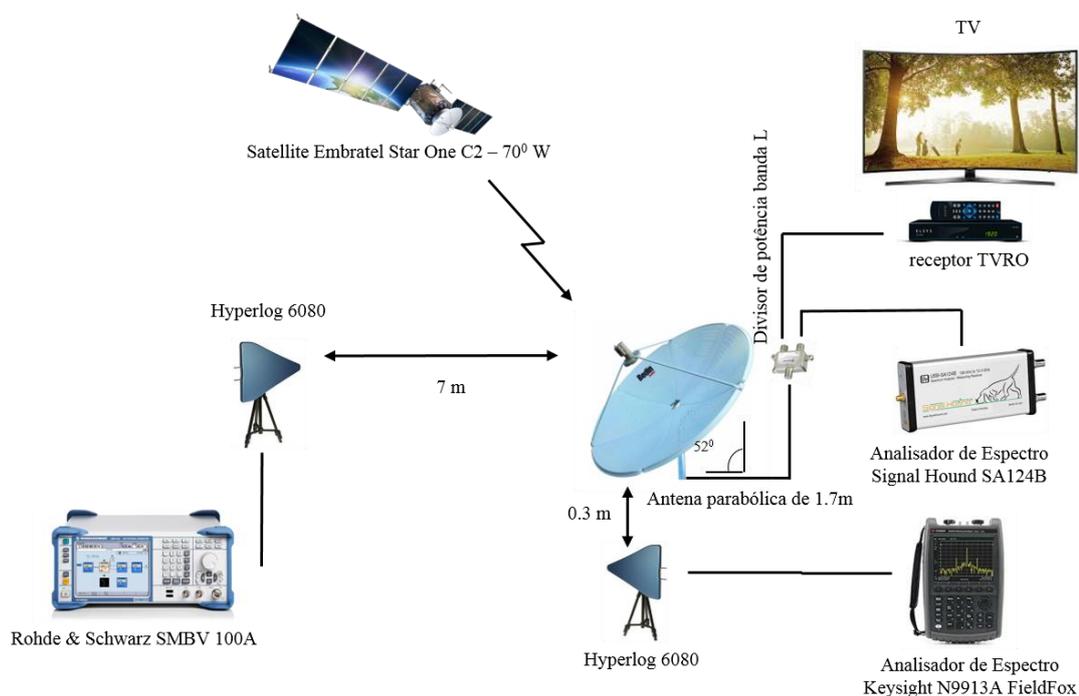


Figura 4-1 - Arranjo experimental para teste de coexistência entre 5G NR e TVRO.

A Figura 4-2 (a), ilustra o espectro do sinal 5G NR gerado pelo SMBV 100A. Analisou-se o sinal 5G NR com um analisador de espectro (FSW 85) da Rohde & Schwarz. A Figura 4-2 (b) mostra a constelação do respectivo sinal, em que os sinais PSS e SSS são representados pela modulação BPSK em azul escuro; o canal PBCH corresponde aos pontos em laranja em modulação QPSK; o canal PDSCH e representado pelos pontos em vermelho com modulação 16-QAM, em amarelo com 64-QAM e azul claro com 256-QAM. A taxa de dados máxima de 1,17 Gb/s podem ser obtidas com a alocação dos 273 *physical resource blocks* (PRB) disponíveis em 256-QAM. A Figura 4-3, retrata o segundo arranjo experimental, destacando o uso do rádio comercial da fabricante Ericsson (modelo: AIR 6488), em substituição ao

gerador da figura anterior, utilizado na rede da operadora TIM que está em testes na cidade de Santa Rita do Sapucaí-MG. Esta foi a 2ª rede de tecnologia 5G instalada no Brasil para testes preliminares do sistema de 5ª geração de telefonia móvel. Esta gnodeB foi utilizada em substituição ao gerador de sinais SMVB100A. Este cenário permite avaliar a coexistência em condições próximas de uma aplicação comercial.

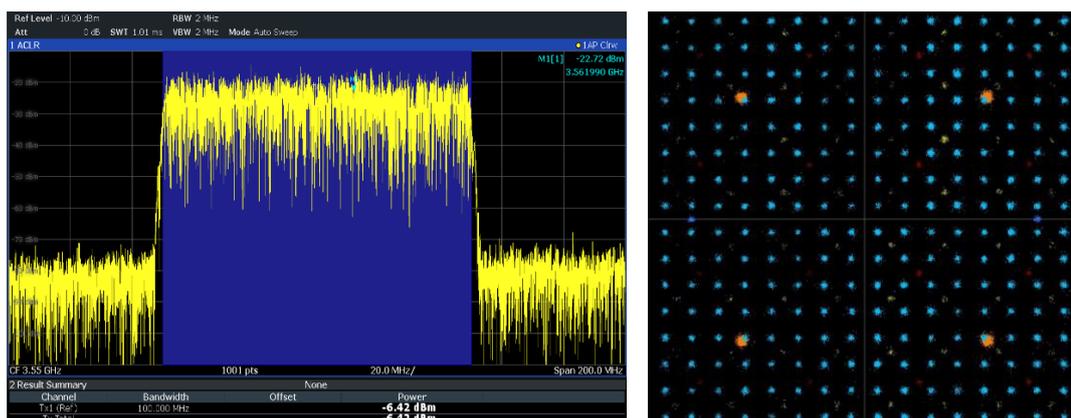


Figura 4-2 – Espectro e constelação do sinal 5G NR em 3,47 GHz.

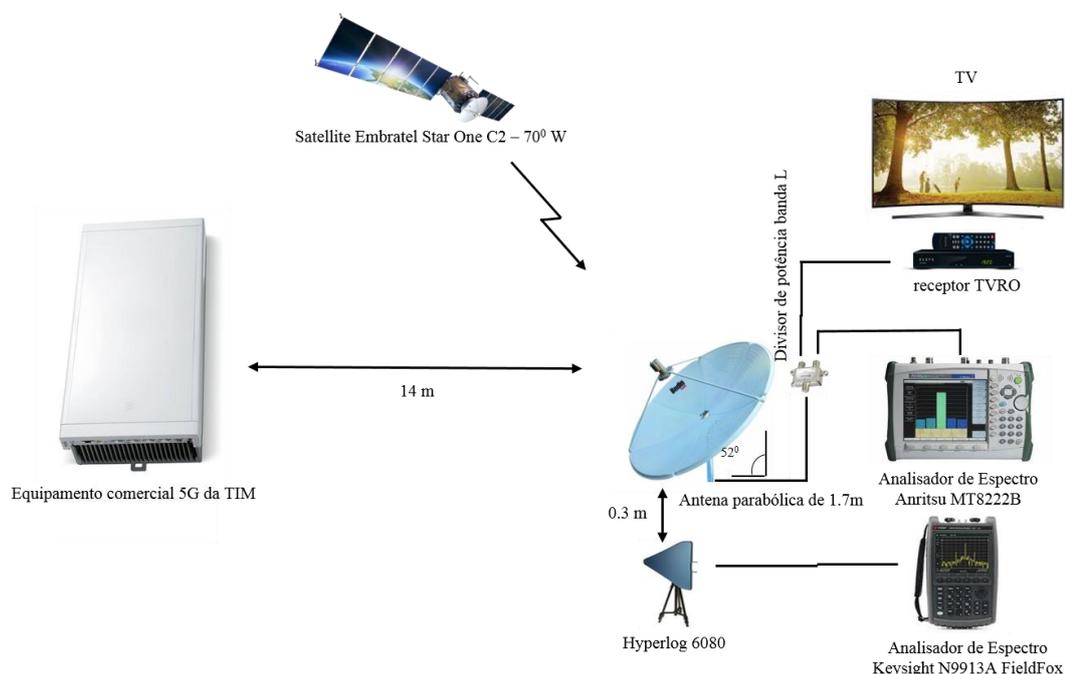


Figura 4-3 - Arranjo experimental para teste de coexistência entre 5G NR e TVRO utilizando rádio comercial 5G da operadora TIM.

Na Figura 4-5, mostra-se o espectro de frequência do sinal gerado pelo rádio AIR 6488, centrado em 3,47 GHz e com largura de banda de 100 MHz. Realizaram-se dois testes para verificar a interferência do sinal 5G NR em TVRO em Banda C. No

primeiro, utilizou-se um rádio comercial da fabricante sueca Ericsson, instalado no campus do Inatel, Figura 4-3. Para o segundo, utilizou-se um gerador de sinais da Rohde & Schwarz simulando uma estação 5G NR, Figura 4-1. Manteve-se o controle de níveis de sinais transmitidos e frequência de operação para avaliar os limiares de interferências do LNBF analisado. A Figura 4.4 ilustra o parque de antenas do Inatel o qual foram realizados os testes.

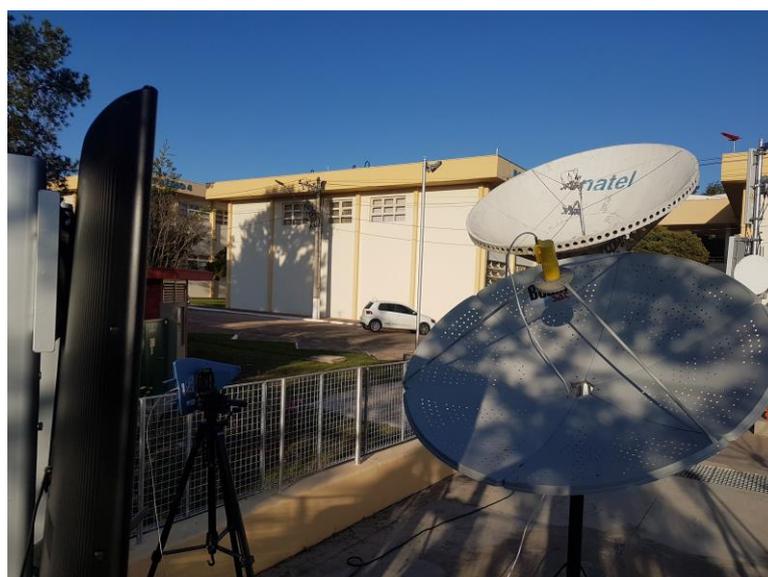


Figura 4-4 – Parque de antenas do Inatel utilizado para os experimentos.

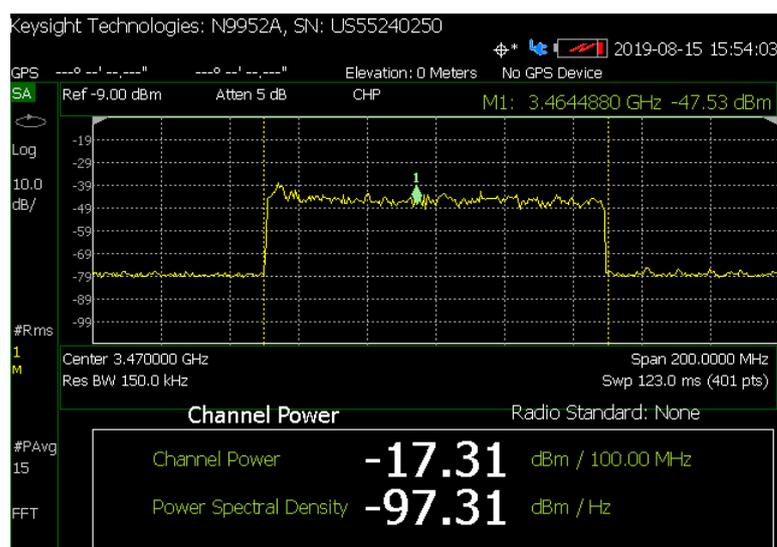
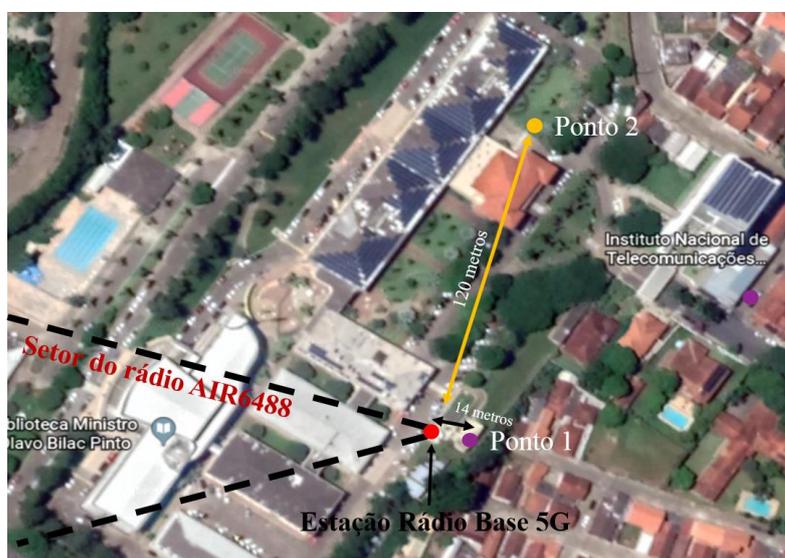


Figura 4-5 - Espectro do sinal 5G NR transmitido pelo rádio da operadora TIM.

4.2. Testes de coexistência com sistema 5G NR da TIM

Transmitiu-se um sinal com frequência central de 3,47 GHz, largura de faixa de 100 MHz utilizando o rádio Ericsson AIR 6488 da operadora TIM. Realizou-se o experimento em dois pontos distintos do campus do Inatel, conforme visto na Figura 4-6 (a). Localizou-se o Ponto 1 a 14 metros do rádio AIR6488 e o Ponto 2 à 120 metros. O receptor do Ponto 1 fica na relação frente-costa da antena do AIR6488 e o do Ponto 2 não possui visada direta para a estação de rádio da Ericsson. A Figura 4-6 (b) apresenta o arranjo experimental do teste de coexistência.



(a) vista aérea dos pontos analisados



(b) fotografia do experimento.

Figura 4-6 – Relatório fotográfico: (a) vista aérea dos pontos analisados; (b) fotografia do experimento.

Analisou-se a interferência avaliando-se a qualidade da imagem de TV na existência do sinal interferente 5G NR em frequência intermediária. Sintonizou-se o canal de TV aberta analógico da Rede Globo de Televisão, com frequência de recepção de satélite de 3.720 MHz em polarização horizontal. Para decodificação, utilizou-se um receptor Elsys, modelo Duomax, que permite decodificar sinais analógicos e digitais. Para os testes, considerou-se a utilização de um LNBF monoponto da fabricante Vivensis. Na Figura 4-7, apresenta-se a imagem da TV no Ponto 1 e com interferência.

Observou-se distorção na imagem de TV com linhas horizontais percorrendo a tela em pontos diferentes com comportamento intermitente. Esta intermitência da interferência é uma característica típica de chaveamento de sinais, comumente presente em sistemas que operam em TDD, nos quais existem a multiplexação no tempo entre *downlink* e *uplink* utilizando o mesmo canal. Analisou-se o processo de conversão de frequências do LNBF para investigar possível interferência pelo rádio AIR6488. Na Figura 4.8, apresenta-se o diagrama em blocos do LNBF, destacando-se a ilustração das frequências analisadas no espectro, na entrada do LNBF e após a conversão para frequência intermediária.



Figura 4-7 – Imagem da TV no Ponto 1 com interferência do sinal 5G NR.

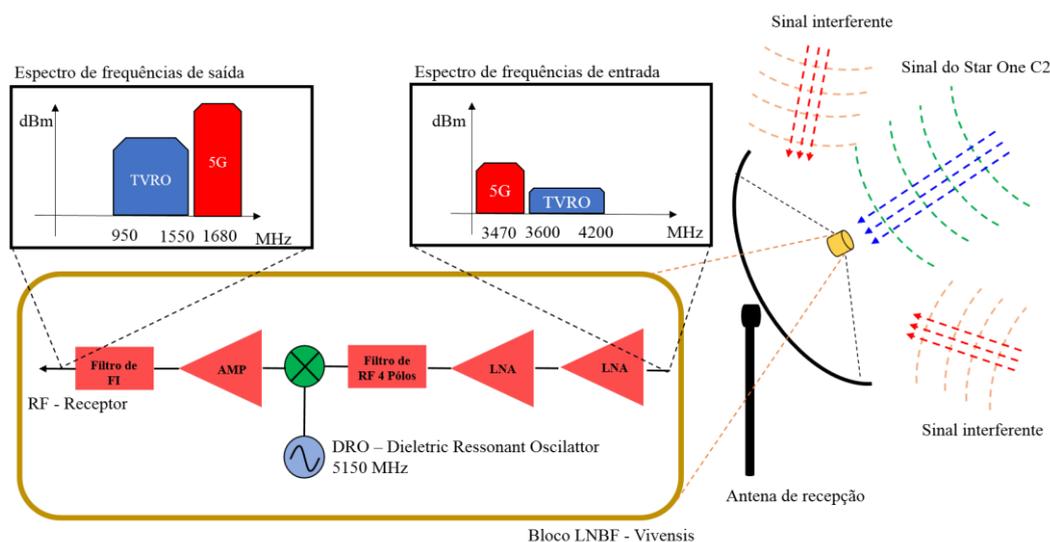


Figura 4-8 – Diagrama em blocos do LNBF e ilustração da análise em função da frequência.

A Figura 4-9, mostra-se o espectro do sinal em frequência intermediária e a imagem da TV com interferência. Os marcadores 2, 3 e $\Delta 2$ identificam o sinal 5G NR amplificado e transladado para espectro de FI na frequência central de 1.680 MHz, devido ao batimento com o oscilador local do LNBF centrado em 5.150 MHz. O marcador 1 identifica o sinal do canal sintonizado na frequência de 3.720 MHz, amplificado e transladado para a frequência de 1.430 MHz, com nível abaixo da portadora 5G NR. Com isso, confirmou-se a interferência do sinal 5G no sistema TVRO.

Posteriormente, avaliou-se a interferência do sinal 5G no sistema TVRO no Ponto 2, cuja distância é de 120 metros em relação ao rádio da operadora TIM. O Ponto 2 é localizado fora da linha de visada direta do rádio AIR6488 e possui obstruções que atenuam o sinal interferente em comparação com o cenário do Ponto 1. Na Figura 4-10 (a), observam-se alguns pontos de interferências na imagem, confirmando a existência de interferência presente no processo de recepção TVRO. Na Figura 4-10 (b), apresenta-se o espectro em FI, na qual verifica-se uma atenuação do sinal 5G NR quando comparado ao espectro da Figura 4-9. Entretanto a interferência ainda existe e seu impacto é confirmado pela degradação da imagem da TV.

Pode-se observar os vídeos dos experimentos realizados nos endereços abaixo:

[Vídeo 1 – Coexistência no ponto 1.](#)

[Vídeo 2 – Coexistência no ponto 2.](#)

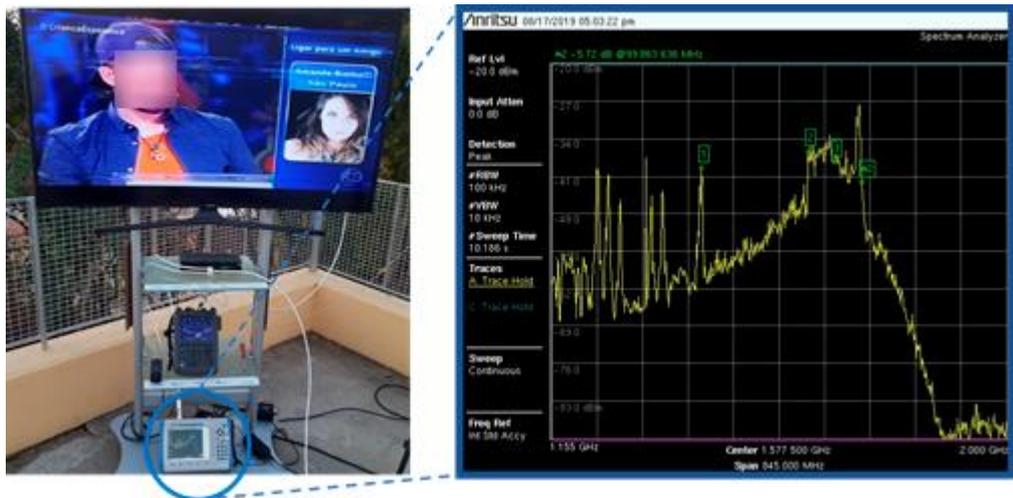
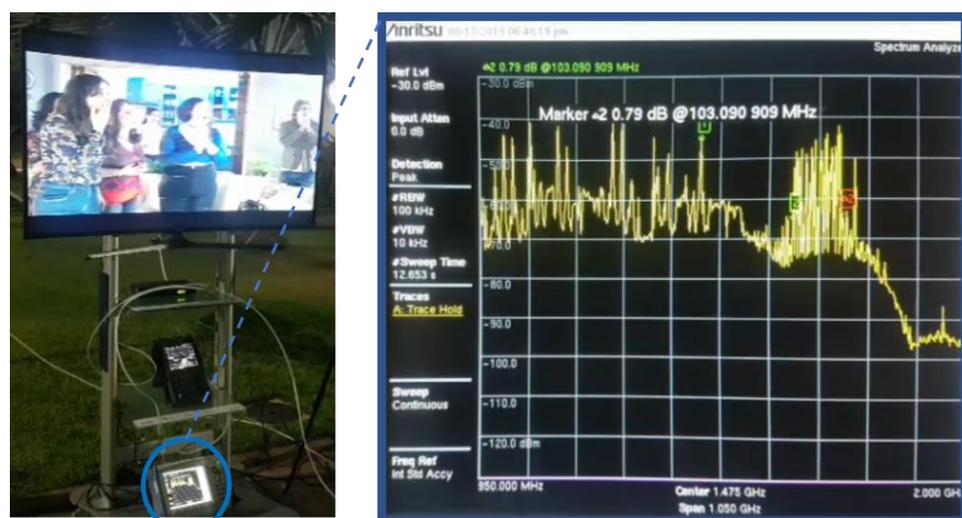


Figura 4-9 – Imagem de TV no Ponto 1 e espectro de FI com presença do 5G NR.



(a) imagem da TV com interferência.



(b) espectro de frequência intermediária com a presença de interferência 5G no Ponto 2.

Figura 4-10 – Imagem da TV com interferência e espectro de frequências em frequência intermediária: (a) imagem da TV com interferência; (b) espectro de frequência intermediária com a presença de interferência 5G no Ponto 2.

4.3. Testes de coexistência com gerador 5G NR de bancada

Os resultados apresentados na Seção 4.2 demonstraram que o sinal 5G NR pode interferir no sistema TVRO. Utilizou-se o gerador de sinais 5G NR para controlar os níveis de potência do sinal 5G NR, para com isso realizar uma análise sistemática do problema. Na Figura 4.11, tem-se o arranjo experimental do sistema de bancada interferente e da estação terrena satelital em análise.

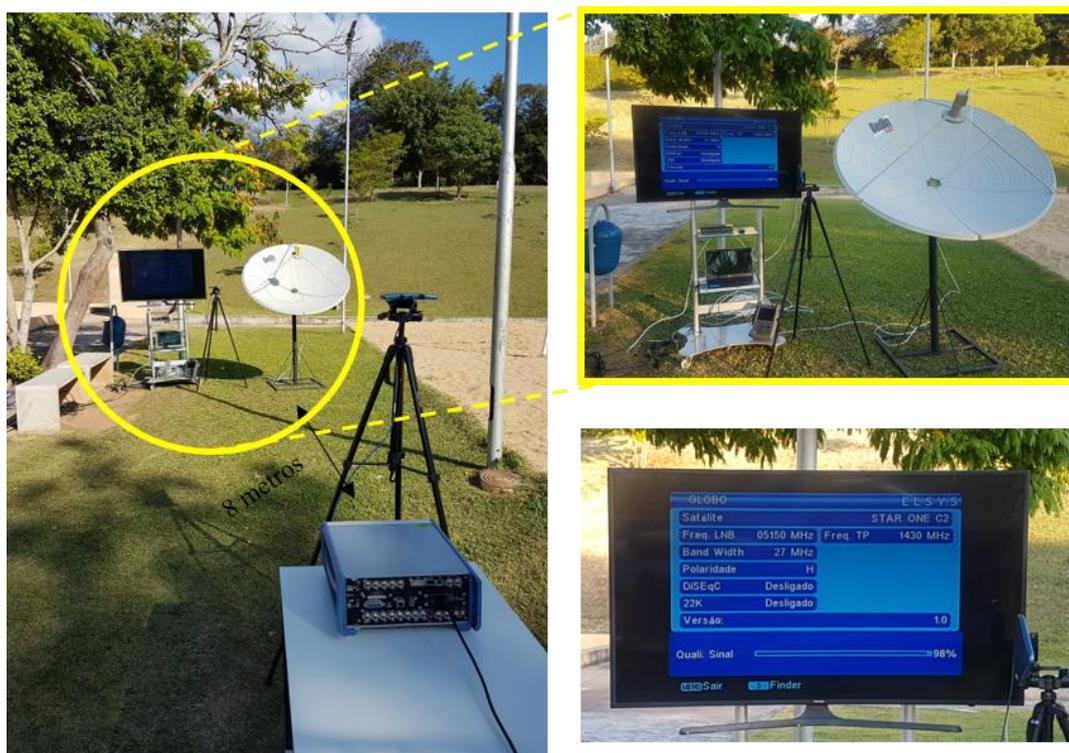


Figura 4-11 – Arranjo experimental utilizando um gerador de sinais 5G NR.

Analisou-se o espectro de frequência intermediária sem a presença de qualquer sinal interferente, conforme ilustra a Figura 4-12. O marcador 1 identifica a frequência da Rede Globo de Televisão, canal sintonizado para este experimento. Por conseguinte, avaliou-se a coexistência entre o 5G NR e o sistema TVRO. Variou-se o nível do sinal 5G de 0 a 18 dBm. Instalou-se a antena transmissora a 8 metros de distância da antena parabólica, e nível de potência do sinal 5G NR medido próximo a antena parabólica foi de -53 à -37,5 dBm, em 3,55 GHz. Na Figura 4-13, observa-se o espectro de FI com a presença do sinal 5G NR interferente. Verifica-se pela

identificação do marcador 4 a frequência de FI de 1,6 GHz, correspondendo a frequência de portadora do 5G NR de 3,55 GHz.

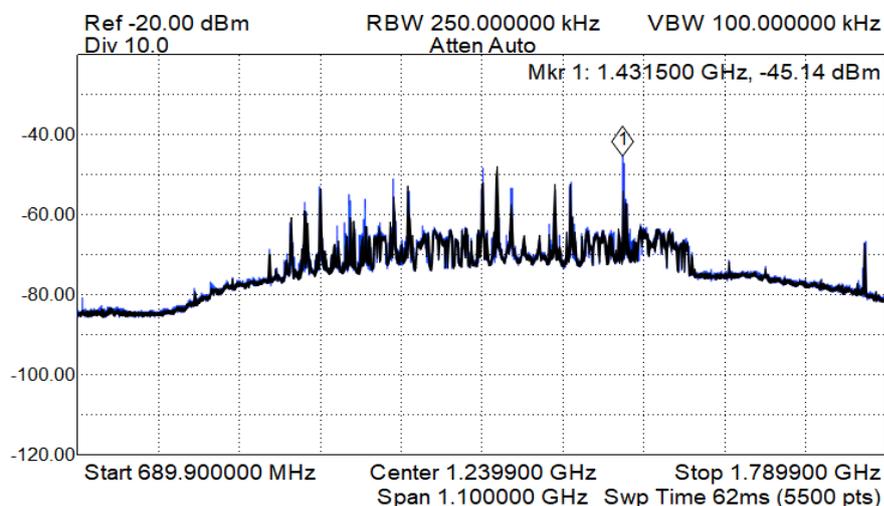


Figura 4-12 – Espectro de frequência intermediária sem sinal interferente.

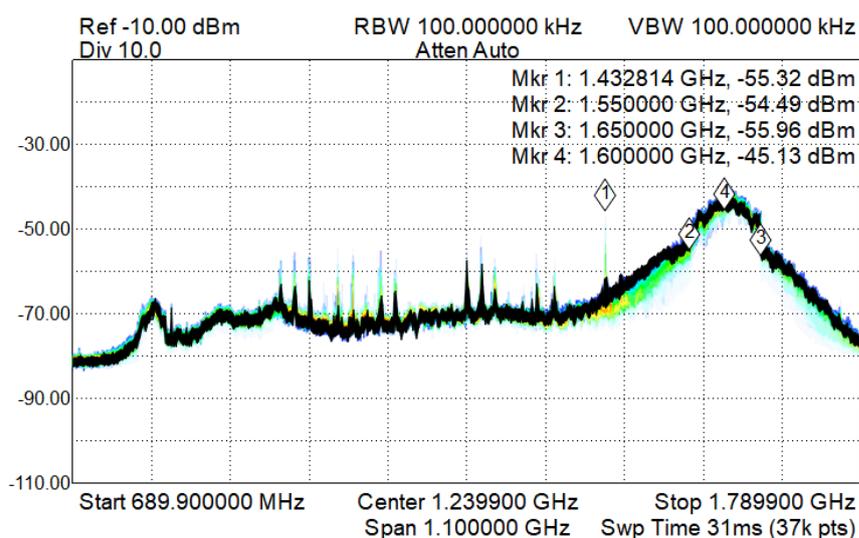


Figura 4-13 - Espectro de frequência intermediária na presença do sinal interferente 5G NR.

A Figura 4-14(a) apresenta a imagem do canal analógico da Rede Globo de Televisão, sintonizado em 3.720 MHz com a presença do sinal 5G NR com nível de potência de -48 dBm. Já a Figura 4-14 (b) mostra a mesma imagem com uma potência de sinal interferente de -46 dBm. Para valores de potência do sinal 5G NR iguais ou superiores à -41 dBm, ocorre a distorção total do sinal de TV, como visto na Figura 4-14 (c). A degradação da imagem ocorre devido a uma alta saturação e distorção mediante os níveis de potência acima do limiar suportado pelos amplificadores e misturadores do LNBF.

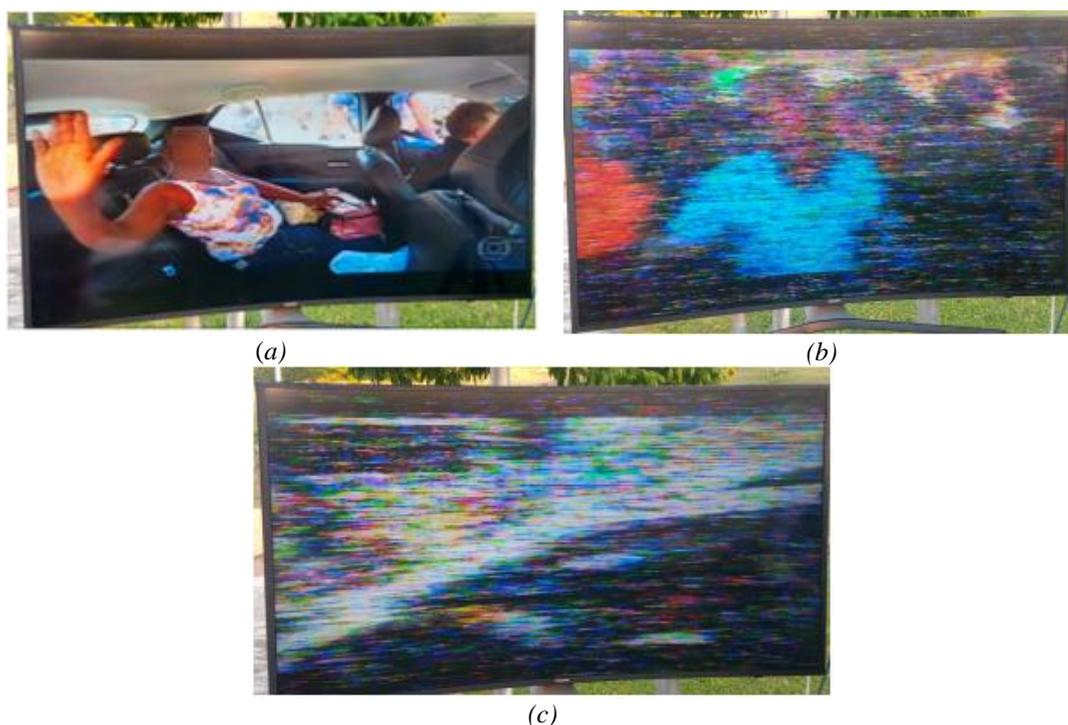


Figura 4-14 – Imagem da TV para diferentes níveis de interferência 5G NR: (a) -48dBm; (b) -46 dBm; (c) -41 dBm.

4.4. Filtro de RF para viabilizar a coexistência entre 5G NR e TVRO

Identificado a interferência, nesta seção apresenta-se o desenvolvimento e caracterização experimental de um filtro de RF para viabilizar a coexistência entre o 5G NR e TVRO na Banda C. Como já relatado anteriormente, 22 milhões de residências utilizam-se do TVRO para recepção de canais de áudio e TV e com objetivo de atender a todos desenvolveu-se um filtro de RF de baixo custo comparado à soluções profissionais de filtros de cavidade que seja acessível à população de baixa renda e possa ser implementado com repetibilidade e em alta escala pela indústria.

Avaliou-se as placas eletrônicas de cinco modelos de LNBFs comerciais de diferentes fabricantes. Verificou-se que muitos não possuem filtro de entrada e os que possuem não satisfazem a condição de coexistência com capacidade de eliminar ou diminuir o efeito das interferências. Além disso, os modelos que afirmavam possuir filtro WiMAX, na verdade, possuem um amplificador de baixo ruído mais robusto com ponto de compressão (P1dB) mais elevado que provê uma maior proteção ao sistema, porém não sendo satisfatória para o sinal 5G NR. Nos testes de campo com quatro

modelos de LNBFs, verificou-se que qualquer sinal de RF modulado ou contínuo, que opere a partir de 2,9 GHz, é suscetível à interferência nos LNBFs avaliados. Alguns LNBFs começam a responder a um sinal interferente um pouco antes ou um pouco depois da frequência de 2,9 GHz, dependendo da largura de faixa do amplificador de baixo ruído empregado no primeiro estágio do LNBF. Este comportamento demonstra a inexistência de um filtro passa faixa de entrada que possa atenuar o sinal interferente e diminuir a degradação da imagem. Conforme visto na Seção 4.3, existe um limiar de sinal interferente para que não ocorra a degradação da imagem, mesmo com presença do sinal interferente. Neste contexto, propôs-se o desenvolvimento de filtro de RF passa faixa planar de baixo custo que tenha uma alta seletividade para mitigar o efeito da interferência do sinal 5G NR.

Iniciou-se a busca por um modelo de filtro passa faixa que se adequasse em questões de seletividade, perda por inserção, complexidade, dimensão e custos. Em UHF ou em micro-ondas, filtros de linhas acopladas com dimensões de aproximadamente meio comprimento de onda tornam os ressonadores muito longos [94]. Filtros do tipo interdigital ou filtros “*comb-line*” possuem aterramento em seus ressonadores, trazendo um alto custo de produção [94, 95]. A estrutura do filtro passa faixa do tipo “*hairpin*” [95] faz com que as linhas acopladas sejam dobradas em formato de U, conforme visto na Figura 4-15. Os filtros do tipo “*hairpin*” são preferidos em aplicações de baixo custo, cuja topologia permite construir filtros mais compactos que filtros de linhas paralelas acopladas de meia onda [94-97].

O preço dos LNBFs comerciais (cerca de 40 reais) influenciou na seleção do substrato dielétrico para projeto do filtro, sendo selecionado o modelo TLX-9-0200-C1 da fabricante Taconic. O substrato apresenta constante dielétrica $\epsilon_r = 2,5$ com tolerância de $\pm 0,5$ na faixa de operação do laminado (0 a 10 GHz). De acordo com a folha de dados do fabricante [98], admite-se $\tan\delta = 1 \times 10^{-4}$ para a faixa de interesse. Desenvolveu-se o filtro para a frequência de 3,7 a 4,2 GHz, devido ao leilão do edital 5G no Brasil prever a utilização da faixa de 3,3 a 3,6 GHz para o novo sistema de telefonia móvel de 5ª geração. Previu-se um intervalo de guarda de 100 MHz entre as tecnologias para se obter um desempenho satisfatório entre rejeição, custo e perda por inserção do filtro. Obrigatoriamente, necessita-se de realocação dos canais de TV

e rádio do Star One C2, operantes no intervalo de guarda de 100 MHz, entre 3,6 e 3,7 GHz, que são listados na Tabela 4.1.

A Figura 4-15 apresenta a topologia final do nosso filtro de RF, com de 11 pólos e resposta em frequência do tipo Chebyshev. Para síntese, utilizou-se o software Keysight Genesys com seu módulo M-Filter que possui síntese de modelos de filtros planares e discretos disponíveis para simulação. Para desenvolvimento e simulação eletromagnética, utilizou-se o programa de simulação ANSYS HFSS. Por conseguinte, apresenta-se na Tabela 4.2 as dimensões referentes a cada seção do filtro projetado.

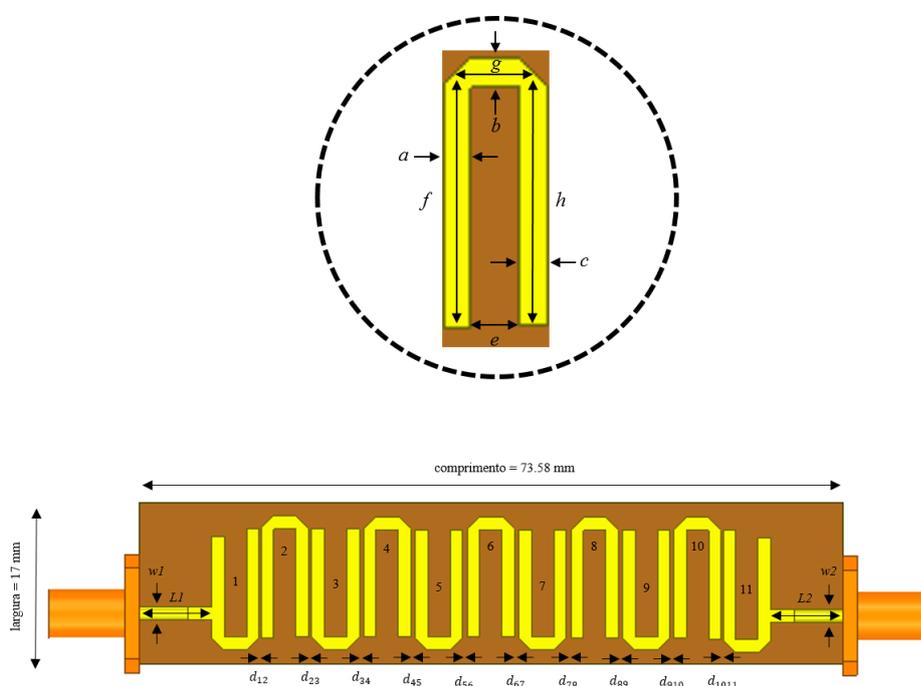


Figura 4-15 – Filtro de RF proposto para viabilizar a coexistência entre 5G NR e TVRO.

Utilizou-se o PNA Network Analyzer N5224A da fabricante Keysight para a caracterização dos parâmetros de espalhamento (S) do filtro proposto conforme documentado na Figura 4.16 (a). Observa-se uma ótima convergência entre os resultados medidos e simulados. Nas Figura 4-16 (b) e Figura 4-16 (c) tem-se um coeficiente de reflexão S_{11} e S_{22} menor que -10 dB para toda a faixa de interesse. Nas Figura 4-16 (d) e Figura 4-16 (e), apresentam-se os resultados do coeficiente de transmissão do filtro, que resultam em uma rejeição superior a 59 dB para a faixa de 3,3 a 3,5 GHz, 35 dB de rejeição média para a faixa de 3,50 a 3,57 GHz e 23,94 dB para a faixa de 3,57 GHz a 3,6 GHz. Por ser um filtro do tipo polinomial Chebyshev,

tem-se uma variação de amplitude na perda por inserção do filtro em banda passante que é típica da curva de resposta em frequência do tipo de filtro em questão. Como resultado obteve-se uma perda por inserção média de aproximadamente 3,36 dB para a faixa de 3,7 a 4,2 GHz. Para as frequências mais altas, tem-se uma rejeição média de 35 dB para a faixa de 4,3 a 4,35 GHz e rejeição acima de 54 dB para frequências superiores a 4,36 GHz.

Tabela 4.1– *Canais do satélite Star One C2 que necessitam ser realocados [extraído de www.portalbsd.com.br/charts/SC2]*

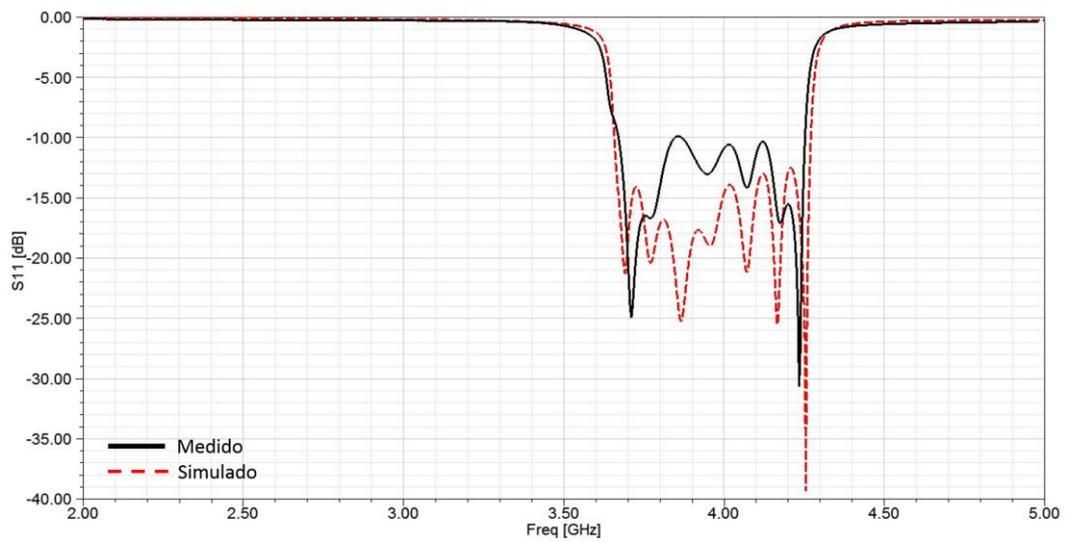
Canais de TV			
Canal	Frequência (MHz)	Polarização	
Rede Século 21	3.633	Horizontal	
TV Horizonte	3.637	Horizontal	
TV Diário	3.642	Horizontal	
TV Assembleia Legislativa do Estado do MT	3.642	Horizontal	
Rede Super	3.648	Vertical	
TV Mirante	3.649	Horizontal	
TV Justiça	3.652	Vertical	
TV Brasil Central	3.656	Horizontal	
Canal Rural	3.660	Vertical	
TV Evangelizar	3.664	Vertical	
Fundação Espírita André Luiz	3.665	Horizontal	
TV Liberal	3.672	Horizontal	
Canal Saúde	3.675	Vertical	
TV Globo Minas	3.680	Horizontal	
Rede Vida	3.685	Vertical	
NSC TV	3.689	Horizontal	
Polishop	3.696	Horizontal	
Canais de Rádio			
América AM	3.637	Horizontal	
Radio Tamoio 900	3.642	Horizontal	
Radio Verdes Mares 810	3.642	Horizontal	
FM 93	3.642	Horizontal	
Radio Sobral	3.642	Horizontal	
Radio Cetama	3.642	Horizontal	
Rádio Super	3.648	Vertical	
Mirante FM	3.649	Horizontal	
Mirante AM	3.649	Horizontal	
Rádio Justiça	3.652	Vertical	
RBC FM	3.656	Horizontal	
RBC AM	3.656	Horizontal	
Renova FM	3.664	Vertical	
Radio Boa Nova	3.665	Vertical	
Rádio Liberal FM	3.672	Horizontal	
Lib Music FM	3.672	Horizontal	
O Liberal CBN	3.672	Horizontal	

Tabela 4.2 - Dimensões do filtro projetado.

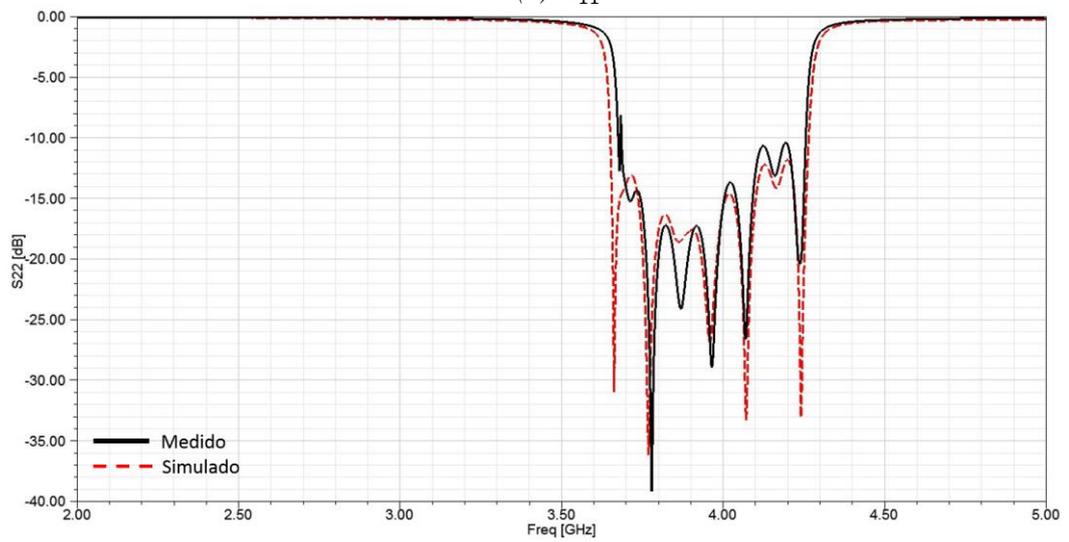
Dimensões					
Dimensões	Valor (mm)	Dimensões	Valor (mm)	Dimensões	Valor (mm)
w_1	1,397	a_1	1,397	a_3	1,338
w_2	1,397	b_1	1,390	b_3	1,370
L_1	7,503	c_1	1,281	c_3	1,331
L_2	7,503	e_1	2,316	e_3	2,312
d_{12}	0,236	f_1	11,418	f_3	12,085
d_{23}	0,361	g_1	3,680	g_3	3,680
d_{34}	0,432	h_1	12,216	h_3	12,053
d_{45}	0,434	a_2	1,281	a_4	1,330
d_{56}	0,454	b_2	1,385	b_4	1,360
d_{67}	0,454	c_2	1,325	c_4	1,332
d_{78}	0,453	e_2	2,329	e_4	2,307
d_{89}	0,412	f_2	11,924	f_4	12,052
d_{910}	0,375	g_2	3,630	g_4	3,670
d_{1011}	0,236	h_2	12,110	h_4	12,064
a_5	1,347	e_7	2,308	h_9	12,053
b_5	1,410	f_7	12,061	a_{10}	1,325
c_5	1,345	g_7	3,680	b_{10}	1,394
e_5	2,309	h_7	12,047	c_{10}	1,282
f_5	12,077	a_8	1,332	e_{10}	2,673
g_5	3,700	b_8	1,343	f_{10}	12,065
h_5	12,061	c_8	1,327	g_{10}	3,650
a_6	1,333	e_8	2,314	h_{10}	12,257
b_6	1,370	f_8	12,032	a_{11}	1,322
c_6	1,333	g_8	3,670	b_{11}	1,420
e_6	2,307	h_8	12,035	c_{11}	1,391
f_6	12,058	a_9	1,345	e_{11}	2,312
g_6	3,998	b_9	1,390	f_{11}	12,297
h_6	12,073	c_9	1,328	g_{11}	3,72
a_7	1,348	e_9	2,310	h_{11}	11,46
b_7	1,360	f_9	12,057		
c_7	1,333	g_9	3,680		



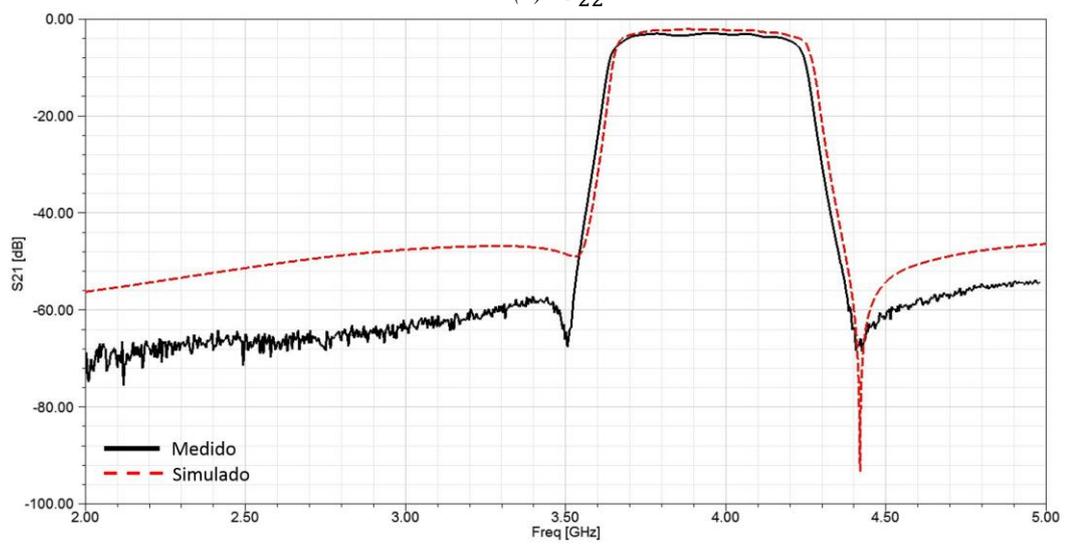
(a) Medições



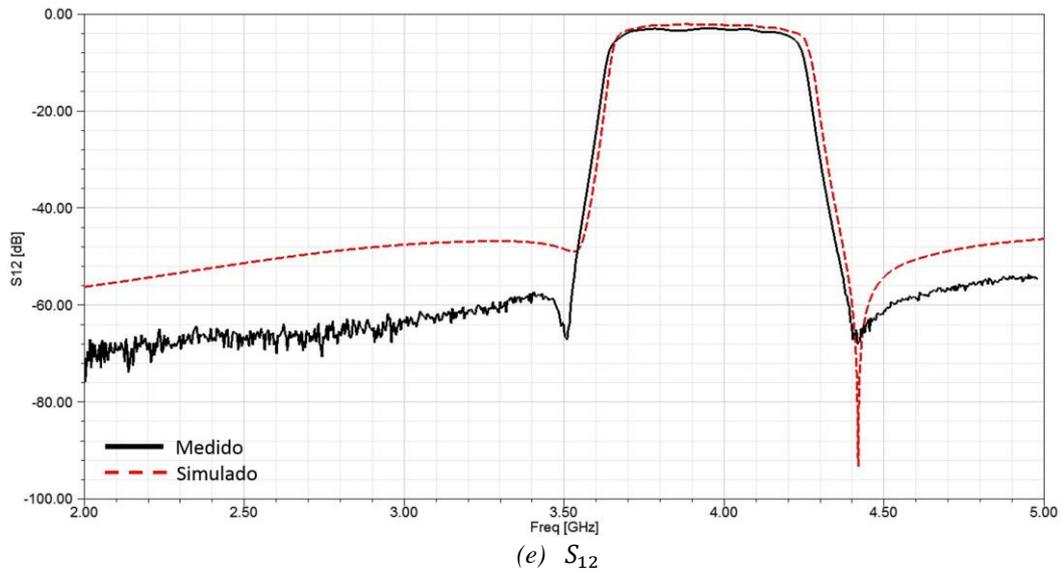
(b) S_{11}



(c) S_{22}



(d) S_{21}



(e) S_{12}
Figura 4-16 – Parâmetros de espalhamento S , medidos e simulados do filtro do tipo “hairpin” proposto; (a) medições; (b) S_{11} ; (c) S_{22} ; (d) S_{21} ; (e) S_{12} .

Observou-se ótima rejeição nas faixas de interesse de operação da tecnologia 5G, podendo o filtro proposto ser considerado uma possível solução para prover maior proteção da estação satelital contra interferências. A proposta tem como objetivo a utilização de um filtro por polarização, incluso na nova placa eletrônica do novo LNBF. A viabilidade de utilização do filtro proposto é condicionada ao lançamento do novo satélite, o Star One D2, que substituirá o atual Star One C2 que chegou no final de sua vida útil. O Star One D2 terá 4 dB a mais de potência que o C2, compensando a perda por inserção média de 3,36 dB do filtro, mantendo o preço do LNBF acessível à população de baixa renda.

4.5. Proposta de alteração do LNBF para viabilizar a coexistência entre 5G NR e TVRO

De acordo com o relatório ITU R S.2199 [100], existem diversos tipos de interferências que podem afetar as estações terrestres satelitais. Dentre elas, cita-se estações terrestres próximas à estação satelital de recepção, que emitem sinais que sobrepõe ou saturam os sinais recebidos pela estação TVRO. O sistema de recepção TVRO é composto por amplificadores de baixo ruído (*Low Noise Amplifier - LNA*) e conversores de baixo ruído (*Low Noise Block - LNB*), especialmente projetados para recepção de baixos níveis de sinais proveniente de satélites, neste caso, geoestacionários. Tipicamente, um LNA/LNB é saturado com potência de entrada

próxima de -50 dBm [100]. Ainda de acordo com a ITU, o LNA/LNB começa a entrar em sua região não linear, gerando produtos de intermodulação e supressão de portadoras, com potência de entrada em torno de 10 dB abaixo do P1dB do LNBF, em torno de - 60 dBm.

Os LNBFs são projetados para serem dispositivos de baixo ruído, justamente pela sua aplicação para recepção de sinais com níveis muito baixos. A medida utilizada para caracterizar um dispositivo amplificador ou um bloco de vários dispositivos em cascata é chamada de figura de ruído, termo este que é alternativo ao uso do termo temperatura de ruído equivalente. Harald Trap Friss formalizou sua pesquisa de figura de ruído em um artigo publicado em 1944 [108], que definiu a figura de ruído como a taxa entre a relação sinal ruído (SNR) de entrada em relação a sua SNR de saída do dispositivo sob teste. De acordo com a equação 4.1:

$$F_n = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{\left(\frac{P_{sin}}{P_{nin}}\right)}{\left(\frac{P_{sout}}{P_{nout}}\right)} \quad (4.1)$$

onde P_{sin} representa a potência do sinal de entrada no dispositivo; P_{nin} representa a potência de ruído de entrada no dispositivo; P_{sout} representa a potência do sinal de saída do dispositivo; e P_{nout} representa a potência de ruído de saída do dispositivo.

A definição de figura de ruído, definida pelo IEEE é: a figura de ruído é a energia entregue a uma carga por um dispositivo dividida pela energia de ruído entregue a uma carga por um dispositivo ideal com o mesmo ganho. Assim definida na equação 4.2:

$$F_n = \frac{E_{noutatual}}{E_{noutideal}} \quad (4.2)$$

Em testes realizados pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) em julho de 2019 [101], avaliou-se o comportamento de LNBFs comerciais em diversos aspectos, dentre eles em relação ao seu ponto de compressão de 1dB. Foram avaliadas 10 amostras, e como resultado o P1dB médio encontrado para a faixa de 3,4 a 3,6 GHz foi de - 63 dBm. O resultado ainda mostrou que existem amostras com P1dB muito baixo, próximo de -77 dBm. Outro resultado de destaque, que está em

concordância com os resultados obtidos neste trabalho é em relação aos LNBFs, que começavam a responder a sinais de entrada próximos a 2,9 GHz. Portanto, a proposta do filtro apresentada na Seção 4.4 traz uma proteção adicional a este modo de interferência. Contudo, é necessário que modificações nos estágios amplificadores e conversores sejam feitas para aumentar o ponto de compressão, tornando o LNBF mais robusto contra sinais interferentes elevados. O filtro de RF proposto reduz o fator de mérito da estação satelital. A compensação deste fator pode ser obtido pelo aumento do ganho da antena receptora ou pela potência do sinal transmissor.

Apresenta-se em simulação (Figura 4.17) uma análise da influência do P1dB em cada estágio do diagrama de um LNBF genérico que tenha comportamento similar aos resultados encontrados em [101]. O maior impacto, como previsto está no primeiro estágio LNA do LNBF, porém os outros estágios amplificadores e inclusive o misturador afetam o desempenho geral do P1dB do dispositivo analisado. Apresenta-se na Tabela 4.3 o P1dB de cada bloco, resultando em um P1dB final do dispositivo de -68,1 dBm, resultado dentro da média dos obtidos em [101]. Para avaliação, utilizou-se o programa de simulação de circuitos de RF, Keysight Genesys, o qual utiliza o método de cálculo de cascata de figura de ruído, ganho de amplificadores, distorção harmônica, pontos de compressão P1dB, ponto de interceptação de segunda e terceira ordem e perdas de elementos passivos na rede do diagrama em blocos.

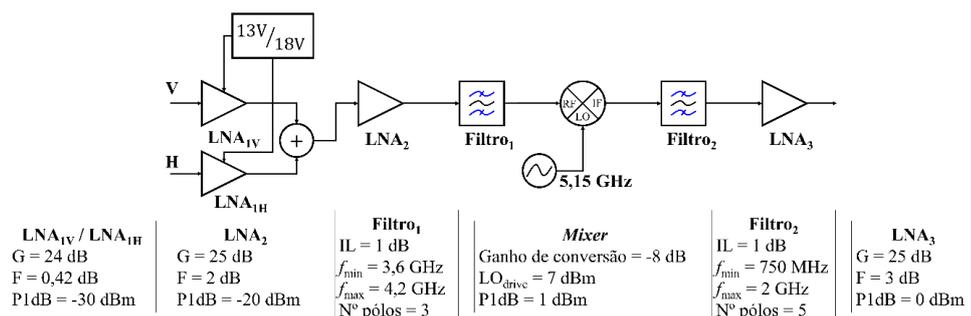


Figura 4-17 – Diagrama em blocos de um LNBF genérico simulado.

Tabela 4.3 – Desempenho do LNBF simulado em relação a P1dB.

P1dB simulado por estágio	
Bloco	P1dB (dBm)
LNA1	-53
LNA2	-68,1
BPF_Cheby_1	-68,1
Mixer	-68,1
IFFilter	-68,1
LNA4	-68,1

Realizou-se a simulação considerando o amplificador modelo QPL9057 da fabricante Qorvo para o primeiro e segundo estágio de amplificação, que opera de 0,6 a 4,2 GHz, possui figura de ruído de 0,54 dB e um P1dB típico de 17 dBm na faixa de interesse. Escolheu-se este componente como candidato para desenvolvimento de um novo LNBF. Para o circuito de misturador, optou-se pelo diodo *shottky* modelo BAT15-04W da fabricante Infineon. Este diodo possui um custo de US 0,20 e pode ser utilizado para desenvolvimento de um misturador do tipo balanceado que provê uma alta isolamento entre portas, 23,1 dB entre porta de oscilador e entrada de RF e 55,1 dB entre porta de oscilador e IF e P1dB de 1,1 dBm [102]. Para o oscilador local previu-se um oscilador do tipo ressonador dielétrico com parâmetros típicos de 7 dBm de potência de saída e um filtro passa baixas para eliminar harmônicos de segunda ordem, evitando emissão de espúrios de segunda e terceira ordem em frequências indesejadas. Para o estágio de FI, considerou-se utilizar um filtro de terceira ordem do tipo passa faixa com componentes discretos e dois amplificadores modelo MMG15241HT1 da fabricante NXP, que possui faixa de operação de 500 a 2.800 MHz, figura de ruído de 1,6 dB, ganho médio de 20,5 dB na faixa de interesse e P1dB de 24 dBm. Estes amplificadores devem possuir o ganho ajustado, realizado pelas redes de casamento de impedância de entrada e saída, para um ganho de 13,5 dB, com objetivo de manter o mesmo ganho do LNBF simulado na Figura 4-17. A Figura 4-18 ilustra a simulação do P1dB final do LNBF proposto. Considerou-se para a utilização, o filtro desenvolvido no Capítulo 4.4, o qual é inserido na entrada no LNBF.

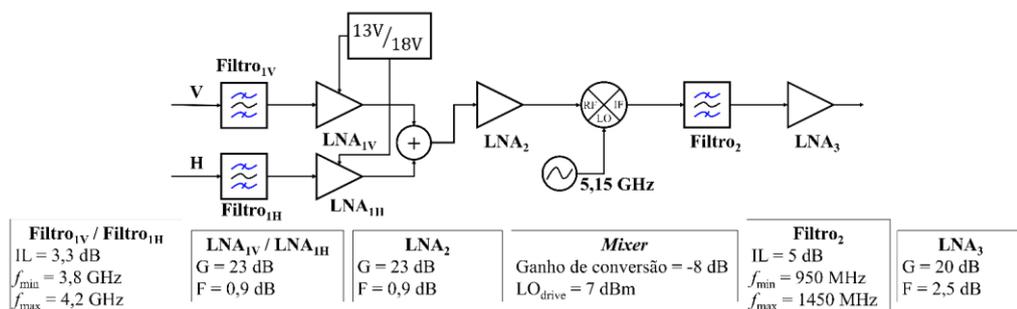


Figura 4-18 - Diagrama em blocos do LNBF proposto e simulado.

Verifica-se, na Tabela 4., que o P1dB final obteve um ganho de 23,11 dB em relação ao LNBF simulado na Figura 4-17, com um P1dB de -46 dBm. Observa-se que o circuito misturador é um limitador em relação ao P1dB resultante.

Tabela 4.4 – Desempenho do LNBF proposto simulado em relação a P1dB.

P1dB por bloco simulado	
Bloco	P1dB (dBm)
LNA1	-4,4
LNA2	-27,5
Mixer	-45
IFFilter	-45
AMP1	-45
AMP2	-45

A proposta de alteração de componentes amplificadores e misturadores se apresenta como alternativa para aumentar a proteção da estação terrestre satelital contra interferências. A recomendação ITU-R SF. 1486 [103] foi aplicada para estes cenários, desconsiderando o *clutter* em nossa análise, com objetivo de avaliar o ganho obtido com as soluções propostas em relação as existentes. Considera-se que não há perda adicionais de obstáculos e terreno no cenário avaliado e que se tem uma linha de visada direta entre sinal interferente e estação satelital. A distância de proteção pode ser calculada por [103]:

$$P_{sat} = EIRP_{FWA} - L + G - R \quad (4.1)$$

onde, P_{sat} é o ponto de compressão de 1dB do LNBF de TVRO, o $EIRP_{FWA}$ é a potência efetivamente irradiada do sinal interferente 5G NR, $G = -10$ dBi é o ganho da antena parabólica do sistema TVRO para uma elevação de 52° [103], L é a perda de propagação no espaço livre e R é a isolação de proteção adicional do sistema, que pode ser: blindagens, filtros e distância entre as estações.

Assume-se uma $EIRP_{FWA} = 75$ dBm, valor típico de sistemas celulares em operação, $L = 32,44 + 20 \log(f) + 20 \log(d)$ [103], para $f=3.550$ MHz e considerando P_{sat} para os dois LNBFs simulados, -68,1 dBm e -45 dBm, tem-se os resultados de distância de proteção do sistema ilustrados na Tabela 4.5. A solução proposta 1 contempla o filtro desenvolvido sem alterações eletrônicas no LNBF comercial, levando-se em consideração a menor rejeição de 23,94 dB na frequência de 3,6 GHz do filtro proposto e a solução proposta 2 contempla o uso do filtro com alterações nos circuitos amplificadores e misturadores para aumentar o P1dB total do LNBF.

Tabela 4.5 – Cálculo da distância de proteção segundo ITU-R SF.1486 para a solução comercial e soluções propostas com sinal interferente centrado em 3.550 MHz.

P1dB por bloco simulado			
LNBF	Filtro de RF	LNBF P1dB (dBm)	Distância de proteção
Comercial	Não	-68,1	30,20 km
Solução proposta 1	Sim	-68,1	1,90 km
Solução proposta 2	Sim	-45	133 m

Observa-se que se tem uma redução de distância de proteção de 30,20 km da solução comercial hoje em operação, para 1,90 km com a utilização do filtro e 133 m com a utilização do filtro e modificações eletrônicas para aumento de P1dB. Considera-se na Tabela 4.6, o sinal 5G NR interferente estar centrado em 3,45 GHz, operando de 3,4 a 3,5 GHz, cuja rejeição do filtro desenvolvido tem 59 dB de atenuação média. Observa-se, que a distância de proteção da estação satelital, referente as soluções propostas 1 e 2, tem uma diminuição considerável em relação a solução comercial hoje existente. Para esta faixa, onde o filtro possui uma rejeição elevada, a distância de proteção diminui para 34,67 metros na solução com filtro e 2,44 metros para a solução mista do filtro com a melhoria proposta no P1dB do novo LNBF.

Tabela 4.6 – Cálculo da distância de proteção segundo ITU-R SF.1486 para a solução comercial e soluções propostas com sinal interferente centrado em 3.450 MHz.

P1dB por bloco simulado			
LNBF	Filtro de RF	LNBF P1dB (dBm)	Distância de proteção
Comercial	Não	-68,1	31,05 km
Solução proposta 1	Sim	-68,1	34,67 m
Solução proposta 2	Sim	-45	2,44 m

Considerando-se a utilização do satélite Star One D2, fora refeita a simulação com um amplificador de baixo ruído na entrada com P1dB elevado e o filtro de RF desenvolvido foi deslocado para o segundo estágio, Figura 4.19. Outra modificação realizada, foi o reprojeto do filtro para a faixa de 3,8 a 4,2 GHz, seguindo a consulta pública feita pela Anatel [105]. Simulou-se a variação de P1dB versus frequência, Figura 4.20, de todo o diagrama em blocos do novo LNBF.

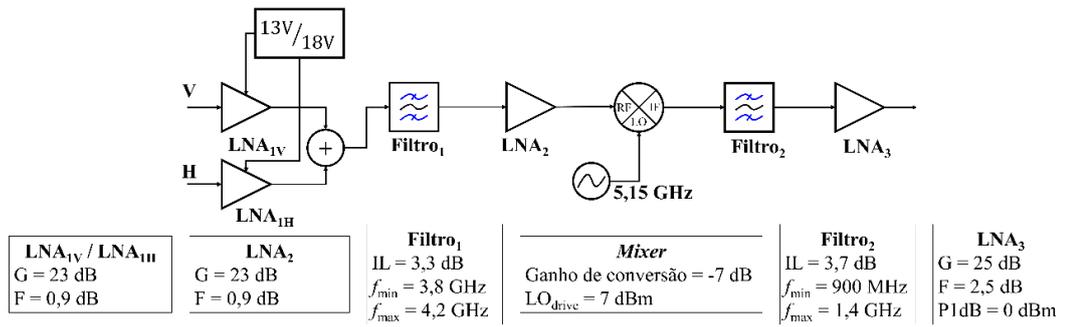


Figura 4-19 - Diagrama em blocos do LNB proposto considerando o filtro de RF após o primeiro estágio amplificador.

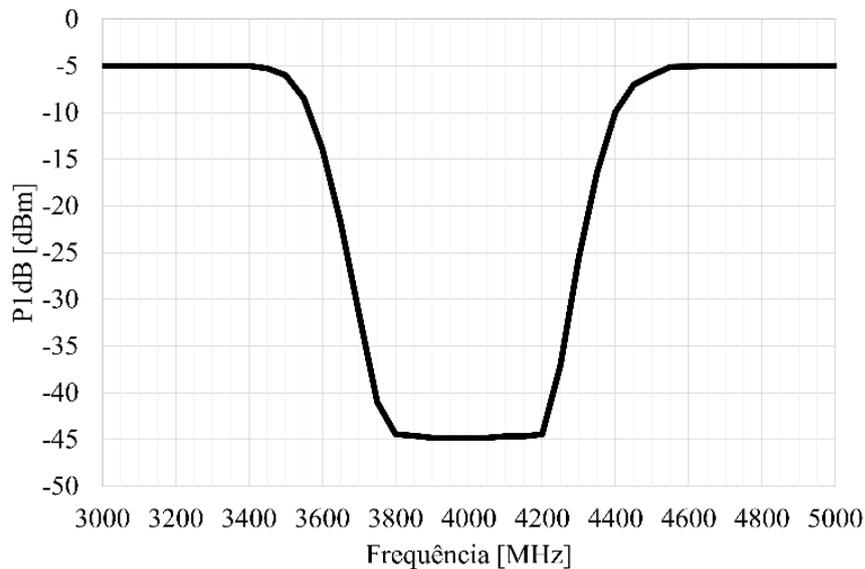


Figura 4.20 – Resposta de P1dB versus frequência de operação do LNB simulado.

Observa-se, que mantendo-se o amplificador de entrada com um P1dB elevado e com baixa figura de ruído, menor que 1 dB, não há um sacrifício considerável da relação portadora ruído (C/N) do enlace satelital, este, um dos limitadores da utilização do filtro de perda por inserção elevada no primeiro estágio. O filtro pode ser deslocado para o segundo estágio, atenuando-se as componentes do sinal interferente e protegendo o segundo estágio amplificador e principalmente o misturador de sinais contra interferentes que possam saturar os mesmos e levar o LNB à distorção. Como resultado, obteve-se um P1dB total do LNB para a frequência de 3,7 GHz de -31 dBm e P1dB superiores a este valor para as faixas de 3.3 a 3.65 GHz, faixas do Edital do 5G no Brasil. Ressalta-se, que nas faixas de frequências superiores, o conjunto filtro e amplificador com elevado P1dB, pode proteger as estações fixas satelitais para

possíveis faixas de uso de interesse acima de 4,8 GHz, quando utilizadas pelo IMT [106]. Desta forma, propõe-se um diagrama em blocos de um novo LNBF que pode atender a coexistência entre o 5G e TVRO com certa margem de relação portadora ruído (C/N) considerando o Satélite Star One D2.

Em 06 de fevereiro de 2020, a Anatel aprovou a consulta pública do edital do maior leilão de espectro já realizado no mundo para o 5G [105]. Em especial, considerou-se a faixa de 3,3 a 3,7 GHz para operação da tecnologia 5G. Ressaltou-se que o intervalo de 3,7 a 3,8 GHz estaria menos protegido de interferência pelas soluções existentes em relação as outras frequências licitadas na faixa de 3,3 a 3,6 GHz. Sugeriu-se um intervalo de guarda de 100 MHz de 3,7 a 3,8 GHz para que seja implantada soluções de filtros e se mantenha uma convivência dos dois sistemas, 5G e TVRO, na mesma banda de frequências [104] [105]. A Anatel ainda alertou para o detalhe em relação ao uso de filtros em frequências superiores da banda C, acima de 4,8 GHz, quando utilizadas para o IMT, já que os LNBF existentes não foram projetados para proteger o sistema em frequências acima de 4,8 GHz [106].

Verifica-se, que as soluções propostas permitem que os dois sistemas continuem operando em banda C, mediante alterações tecnológicas. Esta implementação, evita o gasto de 2,9 bilhões de reais [107], estimado pela Associação Brasileira de Rádio e Televisão (Abratel), para uma possível migração de todo o sistema satelital hoje operante em Banda C para banda Ku. A solução de filtro passa faixa aliada a modificações do P1dB de amplificadores e misturadores atende aos requisitos de proteção da estação satelital para convivência entre os sistemas e ainda provê uma atenuação acima de 54 dB para sinais interferentes acima de 4,36 GHz mantendo o sistema mais protegido quanto a possíveis interferências acima de 4,8 GHz.

O custo da solução proposta é 99% menor que a solução de filtro de cavidade comercial da fabricante NORSAT, modelo BPF-C-3, para uma produção em larga escala de 100 mil unidades do novo LNBF. O impacto desta solução e a acessibilidade da tecnologia à toda a população permite que as operadoras dos sistemas de distribuição via satélite e as operadoras de telefonia móvel continuem utilizando a banda C que é uma faixa estratégica do espectro em compromisso de disponibilidade de espectro e alcance de comunicação.

Capítulo 5

5. Conclusões e trabalhos futuros

O trabalho apresentou análises experimentais de coexistência da tecnologia de telefonia móvel de quinta geração 5G NR, e sistemas terrestres e satelitais. No Capítulo 1, apresentou-se uma breve introdução sobre a evolução dos padrões 4G até o 5G, o desafio de inclusão social ao acesso à internet, a motivação para o estudo de coexistência terrestre utilizando a banda de 700 MHz e o desafio da coexistência do 5G NR com TVRO na banda C. No Capítulo 2, fez-se uma revisão sobre os fundamentos relacionados à camada física das tecnologias: LTE-A Pro NB-IoT e 5G NR. Enfatizou-se os fundamentos do 5G NR, delineando os aspectos de seus modos de operação, detalhes de camada física e canais de comunicação, devido à sua importância no tema de coexistência e resultados apresentados ao longo do trabalho.

No Capítulo 3, expôs-se uma análise de coexistência em canal adjacente entre sistemas LTE-A Pro e 5G NR, operando em canais de 10 MHz na banda de 700 MHz. Encontrou-se um *offset* de frequência mínimo entre as portadoras 5G NR e LTE-A Pro para diferentes ordens de modulação do 5G NR: QPSK, 16, 64 e 256 QAM. Obteve-se uma distância mínima de 9,4 MHz entre sistemas para atendimento dos pré-requisitos mínimos do 3GPP. Propôs-se utilizar um único canal de 10 MHz para acomodar múltiplas tecnologias, LTE-A Pro 5G NR e três portadoras NB-IoT. Utilizou-se o recurso CORESET do 5G NR para desligar portadoras OFDM do 5G NR e alocar sinais de controle e dados, de maneira a evitar colisões com sinais das outras tecnologias. Apresentou-se, uma análise de desempenho experimental em função de magnitude de erro vetorial médio para os canais de controle e dados de cada tecnologia comprovando a viabilidade da coexistência pacífica entre 5G e 4G utilizando o mesmo canal. Adicionalmente, foi apresentado o resultado de um *walk test* indoor realizado

com um escâner para comprovar o desempenho da rede 5G NR em termos de KPIs no cenário de canal adjacente na banda de 700 MHz.

O grupo de pesquisa do Laboratório WOCA foi pioneiro em estudos científicos relacionados à coexistência do sistema TVRO com o novo padrão 5G NR em banda C no Brasil. No Capítulo 4, apresentaram-se os experimentos que comprovam a interferência do 5G NR em TVRO. Realizou-se os experimentos em cenários de interferência utilizando equipamentos comerciais e de teste e medição. Além disso, realizou-se uma análise desta interferência em termos de degradação da imagem de TV e propôs-se o desenvolvimento de um filtro de RF do tipo planar com baixo custo e alto desempenho. O protótipo do filtro proveu uma rejeição acima de 59 dB para a faixa de 3,30 a 3,50 GHz, 35 dB de rejeição média para a faixa de 3,50 a 3,57 GHz e 23,94 dB para a faixa de 3,57 GHz a 3,60 GHz. Apresentou-se, por conseguinte a proposta de modificação do ponto de compressão de 1dB dos blocos amplificadores e misturadores dos LNBFs de TVRO, com objetivo de aumentar a robustez do LNBF contra o efeito de bloqueamento de receptor. Finalmente, relatou-se resultados analíticos baseados na recomendação do ITU-R SF1886 que comprovam a eficácia das propostas apresentadas em termos de distância máxima de proteção da estação satelital contra interferências que reduziu a distância da proteção da estação satelital de 30,2 km para 133 metros na solução utilizando o filtro e alterações eletrônicas nos componentes do LNBF.

Os resultados do desenvolvimento do novo filtro de baixo custo, aliado às modificações eletrônicas se mostraram possíveis soluções tecnológicas, potenciais para transferência para a indústria, visando a adaptação e possível implementação comercial, com objetivo de manter a banda C viável para ambas tecnologias, 5G NR e TVRO. Como trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um algoritmo para alocação dinâmica dos recursos no espectro das tecnologias terrestres e para a coexistência satelital sugere-se o desenvolvimento de um novo LNBF com as melhorias propostas neste trabalho.

Apêndice

As Figuras A.2, A.3 e A.4 apresentam a simulação eletromagnética da intensidade de campo elétrico na estrutura do filtro de RF, apresentada no Capítulo 4, para cada faixa especificada nas bandas de rejeição e passagem apresentadas na Figura A.1.

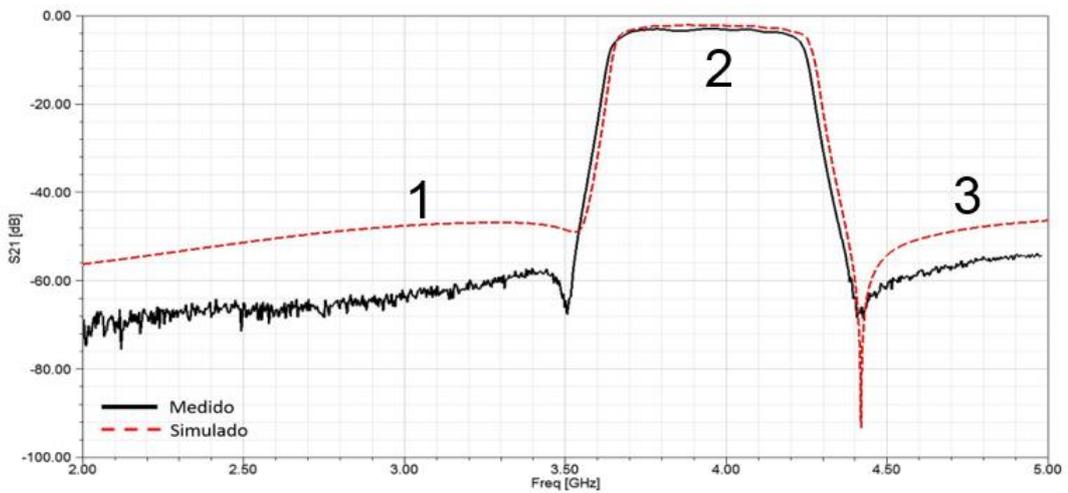


Figura A.1 – Resposta em frequência do filtro projetado.

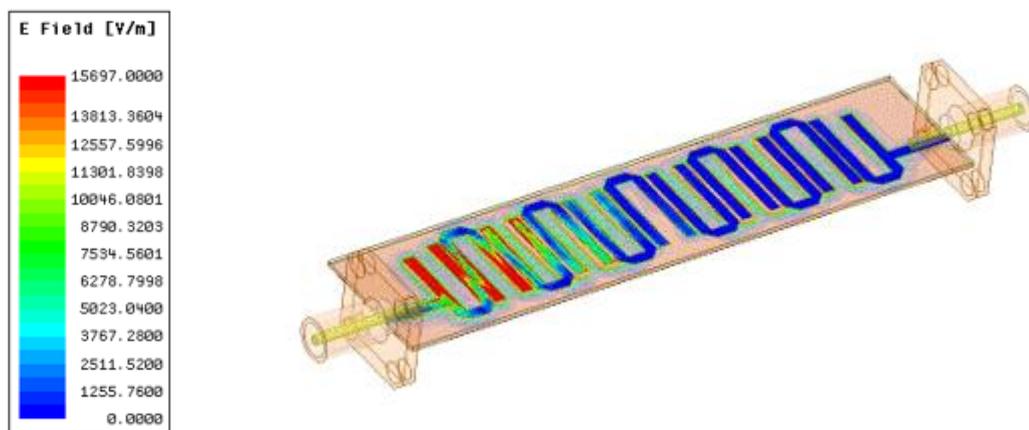


Figura A.2 – Intensidade de campo elétrico na banda de rejeição 1.

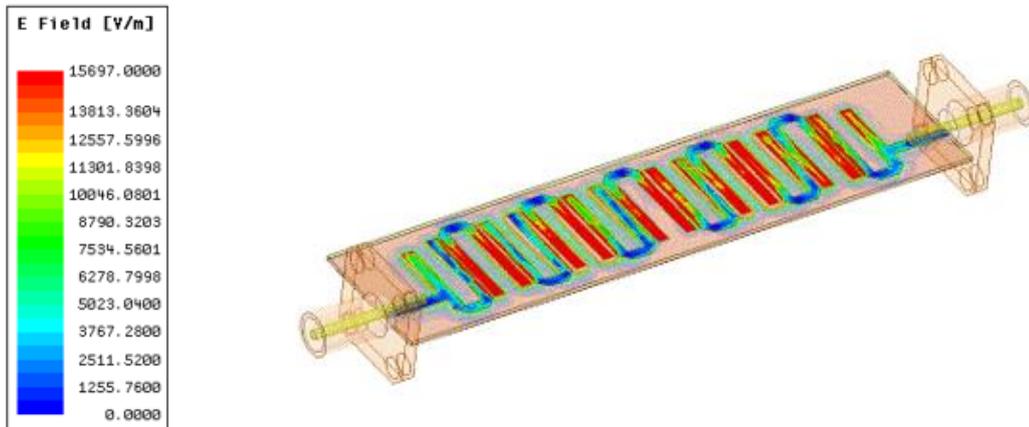


Figura A.3 – Intensidade de campo elétrico na banda de passagem 2.

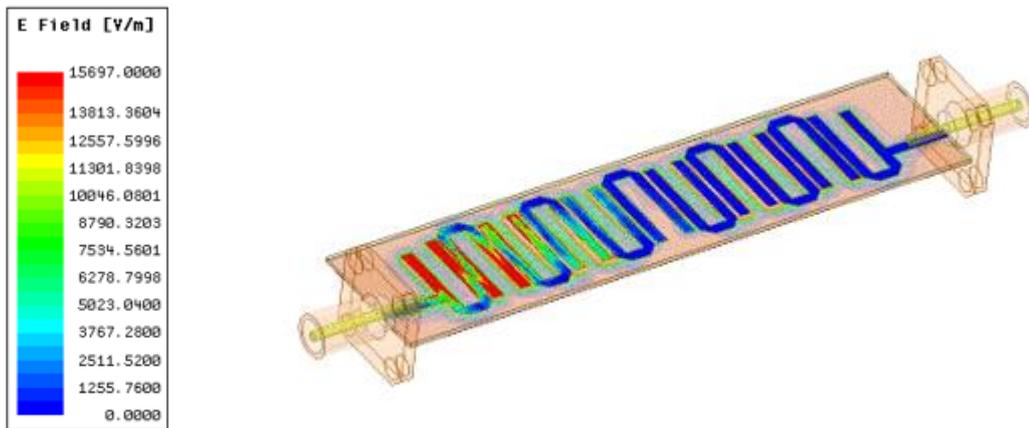


Figura A.4 – Intensidade de campo elétrico na banda de rejeição 3

A Figura A.5 apresenta a solução proposta considerando um intervalo de guarda entre a faixa de 3,6 a 3,7 GHz para viabilizar a coexistência entre o sinal 5G e TVRO na banda C.

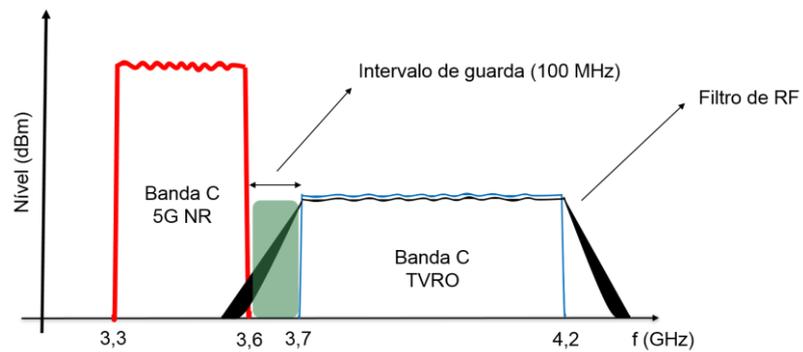


Figura A.5 – Proposta de convivência entre 5G e TVRO operando na Banda C.

Apresenta-se na Figura A.6 a ilustração do cenário de coexistência entre a estação fixa terrestre (FWA) 5G NR e a estação fixa satelital (FSS) TVRO. Apresenta-se nas Figuras A.7, A8, A9 e A10 os resultados de simulações de cálculo de distância de proteção satelital realizados no MATLAB com a implementação das recomendações do ITU-R SF 14.86 e ITU-R S.465.6 apresentadas no Capítulo 4 e por fim é apresentado seu código fonte.

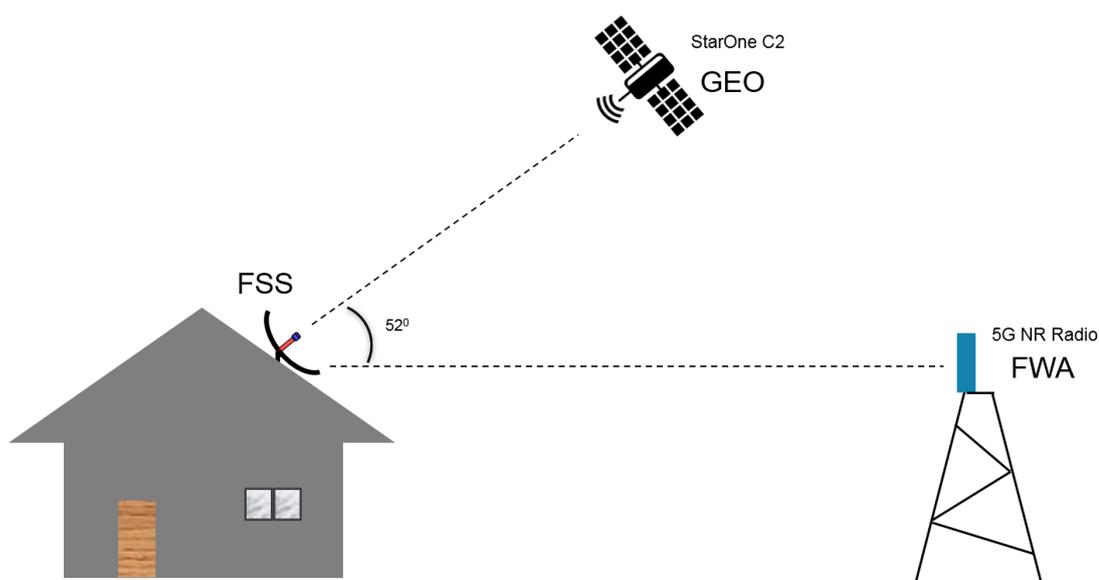


Figura A.6 – Cenário de possível interferência em sistemas TVRO operando em Banda C.

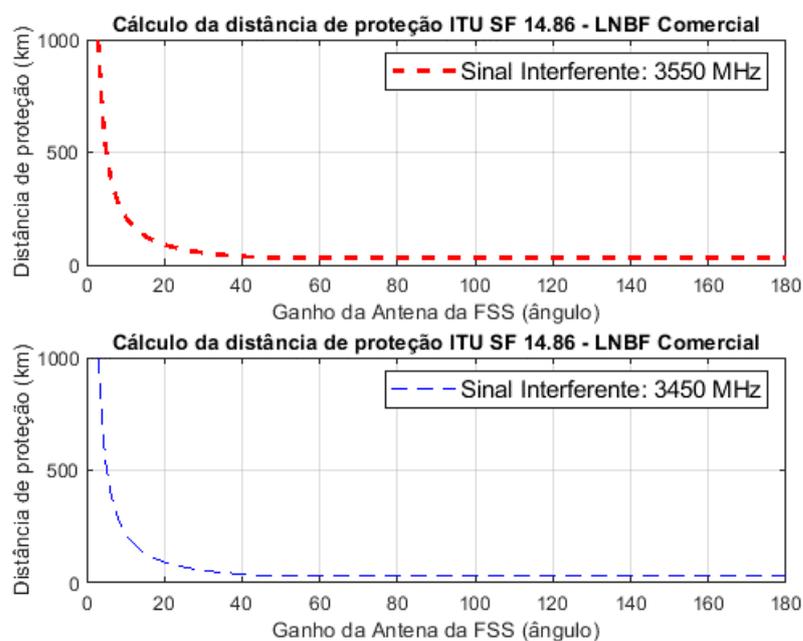


Figura A.7 – Simulação da distância de proteção para LNBF comerciais.

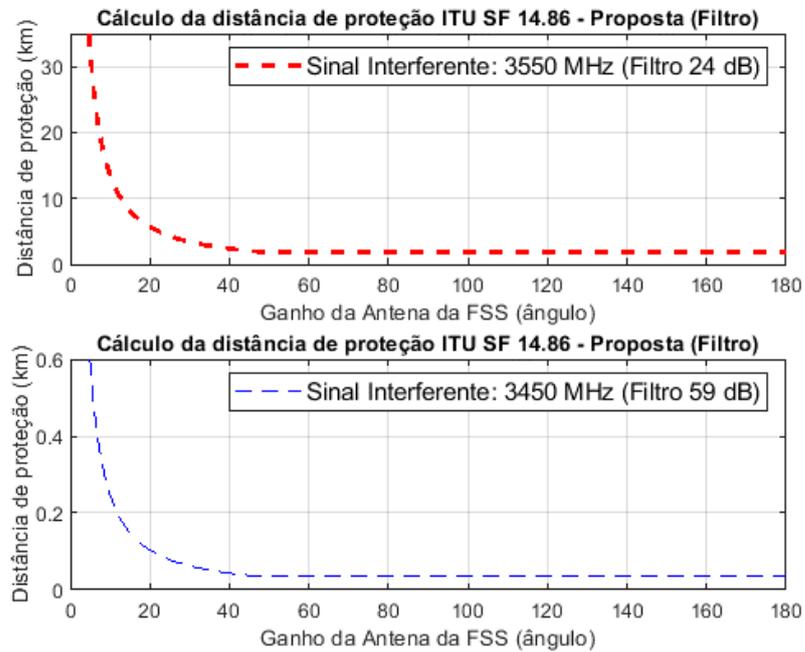


Figura A.8 – Simulação da distância de proteção para a proposta considerando-se apenas a utilização do filtro de RF.

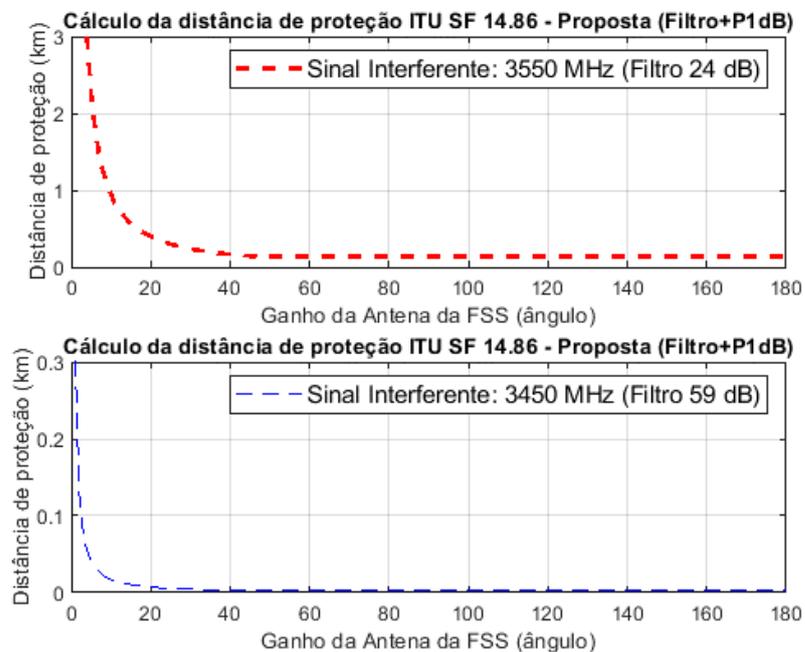


Figura A.9 – Simulação da distância de proteção para a proposta considerando-se o filtro de RF com a modificação do P1dB do LNB.

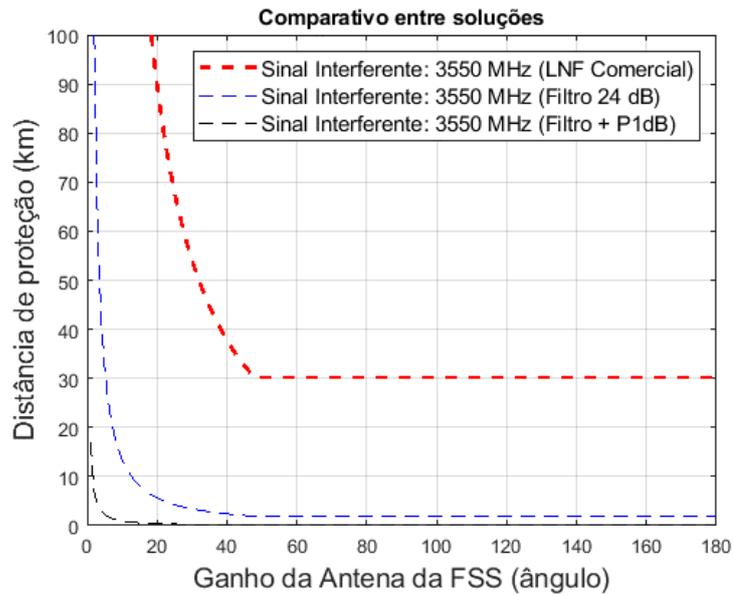


Figura A.10 – Comparativo da distância de proteção entre as soluções.

**Programa do MATLAB para cálculo da distância de proteção da estação fixa de satélite
utilizando as recomendações da ITU-R SF 14.86 e ITU-R S.465-6**

```

% Cálculo da distância de proteção da estação fixa de satélite utilizando
% as recomendações da ITU-R SF 14.86 e ITU-R S.465-6
% Mestrando: Luciano Camilo Alexandre
% Orientador: Dr. Arismar Cerqueira Sodré Junior
% Data: 30-04-2020
% Parâmetros de entrada
Psat= -68.1; % Potência de saturação do LNBF
EIRP=75; % Potência efetivamente radiada pela FWA
%R=0; % Atenuação do filtro na frequência de interferência
filtro = 'no';
f=3.55; % Frequência do sinal interferente
%Inicializa  o de variáveis
i=1:1:180;
d = zeros(1, 180);
G = zeros(1, 180);
angulo=1:1:180;
%Resposta em frequência do filtro para frequências interferentes em Banda C
if (filtro == 'ok')

```

```

if(f>3.3) && (f<3.4)
R=59;
end
if (f>3.4) && (f<3.5)
R=59;
end
if (f>3.5) && (f<3.6)
R=24;
end
else
R=0;
End
%Condições e cálculo da distância de proteção
for i=1:1:180
if (angulo(i)>48)
G(i)=-10;
d(i)=10^((EIRP-Psat+G(i)-R-92.5-20*log10(f))/20);
else
G(i)=32-25*log10(angulo(i));
d(i)=10^((EIRP-Psat+G(i)-R-92.5-20*log10(f))/20);
end
end
%Plotagem dos gráficos
%plot(angulo,d,'g:s');
%subplot(2,1,1);
plot(angulo,d,'--r','linewidth',2,'MarkerSize',6);
title('Cálculo da distância de proteção ITU SF 14.86 - Proposta (Filtro+P1dB)',
'FontSize',11);
xlabel('Ganho da Antena da FSS (ângulo)','FontSize',14);
ylabel('Distância de proteção (km)','FontSize',14);
legend({'Sinal Interferente: 3550 MHz (Filtro 24 dB)', 'FontSize',11);
axis([0 180 0 3])
grid on

```

```

hold on
Psat= -68.1;
EIRP=75;
%R=24;
filtro='ok';
f=3.55;
i=1:1:180;
d = zeros(1, 180);
G = zeros(1, 180);
angulo=1:1:180;
%Resposta em frequência do filtro para frequências interferentes em Banda C
if (filtro == 'ok')
if(f>3.3) && (f<3.4)
R=59;
end
if (f>3.4) && (f<3.5)
R=59;
end
if (f>3.5) && (f<3.6)
R=24;
end
else
R=0;
end
%Condições e cálculo da distância de proteção
for i=1:1:180
if (angulo(i)>48)
G(i)=-10;
d(i)=10^((EIRP-Psat+G(i)-R-92.5-20*log10(f))/20);
else
G(i)=32-25*log10(angulo(i));
d(i)=10^((EIRP-Psat+G(i)-R-92.5-20*log10(f))/20);
end
end

```

```

end

%plot(angulo,d,'g:s');

%subplot(2,1,2);

plot(angulo,d,'--b','linewidth',0.1,'MarkerSize',2);

title('Cálculo da distância de proteção ITU SF 14.86 –
Proposta (Filtro+P1dB)','FontSize',11);

xlabel('Ganho da Antena da FSS (ângulo)','FontSize',
14);

ylabel('Distância de proteção (km)','FontSize',14);

axis([0 180 0 100])

legend({'Sinal Interferente: 3550 MHz (LNF Comercial)
','Sinal Interferente: 3550 MHz (Filtro 24 dB)'},
'FontSize',11);

grid on

hold on

Psat= -45;

EIRP=75;

%R=24;

filtro == 'ok';

f=3.55;

i=1:1:180;

d = zeros(1, 180);

G = zeros(1, 180);

angulo=1:1:180;

%Resposta em frequência do filtro para frequências interferentes em Banda C

if (filtro == 'ok')

if(f>3.3) && (f<3.4)

R=59;

end

if (f>3.4) && (f<3.5)

R=59;

end

if (f>3.5) && (f<3.6)

```

```

R=24;
end
else
R=0;
end
%Condições e cálculo da distância de proteção
for i=1:1:180
if (angulo(i)>48)
G(i)=-10;
d(i)=10^((EIRP-Psat+G(i)-R-92.5-20*log10(f))/20);
else
G(i)=32-25*log10(angulo(i));
d(i)=10^((EIRP-Psat+G(i)-R-92.5-20*log10(f))/20);
end
end

%plot(angulo,d,'g:s');
%subplot(2,1,2);
plot(angulo,d,'--k','linewidth',0.1,'MarkerSize',2);
title('Comparativo entre soluções','FontSize',11);
xlabel('Ganho da Antena da FSS (ângulo)','FontSize',14);
ylabel('Distância de proteção (km)','FontSize',14);
axis([0 180 0 100])
legend({'Sinal Interferente: 3550 MHz (LNF Comercial)', 'Sinal Interferente: 3550 MHz (Filtro 24 dB)', 'Sinal Interferente: 3550 MHz (Filtro + P1dB)'}, 'FontSize',11);
grid on
hold on

```

Apresenta-se na Figura A.11 e A.12 as imagens da TV em canais analógicos e digitais com a presença de interferência abaixo do limiar de P1dB do LNBF. Em complementação apresenta-se nas Figuras A.13 e A.14 as imagens da TV para canais analógicos e digitais com a presença de interferência com nível acima do limiar de P1dB do LNBF avaliado no Capítulo 4.



Figura A.11 – Imagem da TV em canal analógico com sinal interferente.



Figura A.12 – Imagem da TV em canal digital com sinal interferente.



Figura A.13 – Imagem da TV em canal analógico com sinal interferente acima do limiar suportado pelo LNBF.

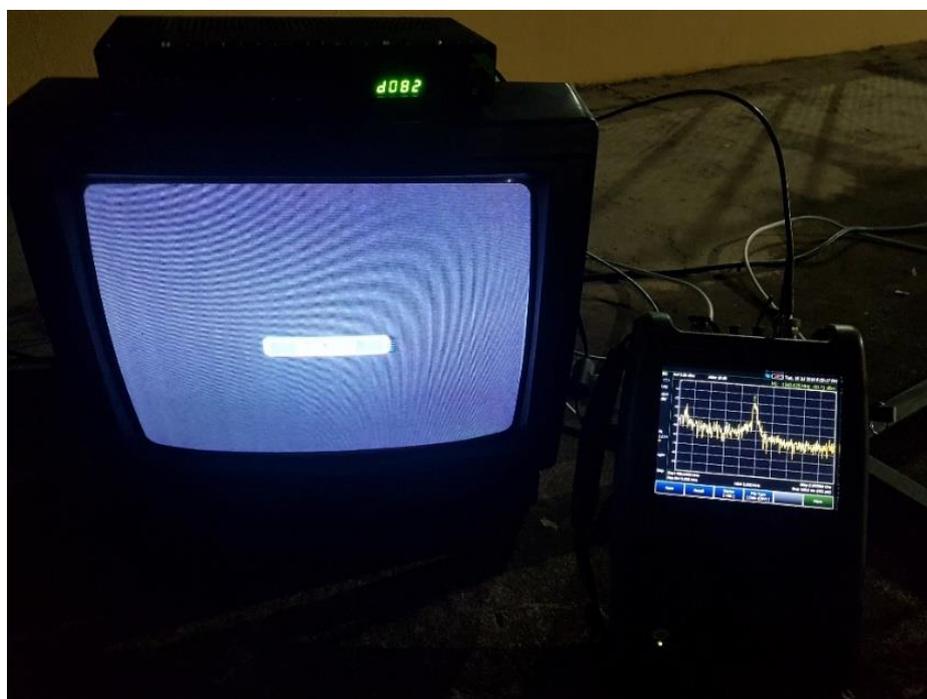


Figura A.14 – Imagem da TV em canal digital com sinal interferente acima do limiar suportado pelo LNBF.

Referências Bibliográficas

- [1] E. Dahlman et al., *LTE The Road to 5G Third Edition*. Academic Press, 2016.
- [2] M. Elsaadany et al., "Cellular LTE-A Technologies for the Future Internet-of-Things: Physical Layer Features and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2544-2572, Fourthquarter, 2017.
- [3] F. Ghavimi e H. Chen, "M2M Communications in 3GPP LTE/LTE-A Networks: Architectures, Service Requirements, Challenges, and Applications," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 525-549, Secondquarter, 2015.
- [4] D. Singhal et al., "LTE-Advanced: Handover interruption time analysis for IMT-A Evaluation," *2011 International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies*, Thuckafay, pp. 81-85, 2011.
- [5] Holma, H. e Toskala, A., *LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012.
- [6] S. Ahmadi, *LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies*. Academic Press, 2013.
- [7] S. Martin, *From Gsm to Lte-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2017.
- [8] R. Ratasuk et al., "Overview of narrowband IoT in LTE Rel-13," *2016 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Berlin, 2016.
- [9] R. Ratasuk et al., "Recent advancements in M2M communications in 4G networks and evolution towards 5G," *2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*, Paris, 2015.

- [10] 3GPP TR 23.720 V13.00, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on architecture enhancements for Cellular Internet of Things (Release 13)", March, 2016.
- [11] R. Ratasuk, B. Vejlgaard, N. Mangalvedhe and A. Ghosh, "NB-IoT system for M2M communication," *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Doha, pp. 428-432, 2016.
- [12] Y. -. E. Wang *et al.*, "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017.
- [13] E. Dahlman *et al.*, *4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2011.
- [14] E. Dahlman *et al.*, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Elsevier/Academic Press, 2018.
- [15] I. Philbeck, "CONNECTING THE UNCONNECTED Working together to achieve Connect 2020 Agenda Targets", ITU White Paper, 2017
- [16] A. Ferreira *et al.*, "5G-RANGE Project Field Trial," *2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Valencia, Spain, pp. 490-494, 2019.
- [17] R. M. Borges *et al.*, "DSP-based Flexible-waveform and Multi-application 5G Fiber-Wireless System," in *Journal of Lightwave Technology*, 2019.
- [18] Sysavy, "LTE to 5G", Research White Paper /5G Americas ,2018.
- [19] L. Wan *et al.*, "4G\5G Spectrum Sharing: Efficient 5G Deployment to Serve Enhanced Mobile Broadband and Internet of Things Applications," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 28-39, Dec. 2018.
- [20] A. Roessler, "Impact of spectrum sharing on 4G and 5G standards a review of how coexistence and spectrum sharing is shaping 3GPP standards," *2017 IEEE*

International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Washington, DC, pp. 704-707, 2017.

- [21] X. Lin *et al.*, "5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 30-37, September 2019.
- [22] E. Dahlman e S. Parkvall, "NR - The New 5G Radio-Access Technology," *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, pp. 1-6, 2018.
- [23] S. Lien *et al.*, "5G New Radio: Waveform, Frame Structure, Multiple Access, and Initial Access," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 64-71, June 2017.
- [24] L. Wan *et al.*, "Enabling Efficient 5G NR and 4G LTE Coexistence," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 1, pp. 6-8, February 2019.
- [25] H. Kim *et al.*, "Interference Analysis of Guardband NB-IoT System," *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, pp. 1370-1372, 2018.
- [26] J. Oh e H. Song, "Study on the Effect of LTE on the Coexistence of NB-IoT," *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, Prague, pp. 610-612, 2018.
- [27] Suzan B. *et al.*, "The Future is Unlicensed: Coexistence in the Unlicensed Spectrum for 5G", arXiv, 2018.
- [28] D. Demmer *et al.*, "Analytical study of 5G NR eMBB co-existence," *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, St. Malo, pp. 186-190, 2018.
- [29] T. Levanen *et al.*, "5G new radio and LTE uplink coexistence," *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Barcelona, pp. 1-6, 2018.

- [30] S. Xu et al., "Opportunistic Coexistence of LTE and WiFi for Future 5G System: Experimental Performance Evaluation and Analysis," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 8725-8741, 2018.
- [31] H. Son e Y. Chong, "Coexistence of 5G system with Fixed satellite service Earth station in the 3.8GHz Band," *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, pp. 1070-1073, 2018.
- [32] H. Tan et al., "Coexistence analysis between 5G system and fixed-satellite service in 3400–3600 MHz," in *China Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 25-32, Nov. 2018.
- [33] J. Yuan et al., "A Study on the Coexistence of TD-LTE/5G and Mobile Satellite Service," *2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Ningbo, China, pp. 119-124, 2018.
- [34] W. A. Hassan et al., "Spectrum-Sharing Method for Co-Existence Between 5G OFDM-Based System and Fixed Service," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 77460-77475, 2019.
- [35] J. Park et al., "Coexistence of mobile-satellite service system with mobile service system in shared frequency bands," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1051-1055, August 2009.
- [36] Fernandes, L.C. e Linhares, "Coexistence conditions of LTE-advanced at 3400-3600 MHz with TVRO at 3625 – 4200 MHz in Brazil", in *Wireless Networks*, no. 25 pp. 105-115, 2017.
- [37] Brazil - IBGE, "Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD)", [online]. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101631_informativo.pdf>. Acesso realizado em outubro de 2019.
- [38] R. Moray, *LTE and the Evolution to 4G Wireless – Design and Measurements Challenges*, Agilent Technologies, 2013.

- [39] R. W. Heath Jr et al., "LTE-advanced pro: part 1 [Guest Editorial]," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 74-75, May 2016.
- [40] A. Elnashar e M. A. El-Saidny, "Looking at LTE in Practice: A Performance Analysis of the LTE System Based on Field Test Results," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, no. 3, pp. 81-92, Sept. 2013.
- [41] M. Lauridsen et al., "From LTE to 5G for Connected Mobility," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 156-162, March 2017.
- [42] Y. Cuibo et al., "Feasibility Study for the LTE-Advanced System," *2015 4th International Conference on Advanced Information Technology and Sensor Application (AITS)*, Harbin, pp. 80-83, 2015.
- [43] A. Roessler, "Impact of spectrum sharing on 4G and 5G standards a review of how coexistence and spectrum sharing is shaping 3GPP standards," *2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Washington, DC, pp. 704-707, 2017.
- [44] A. Haidine e S. E. Hassani, "LTE-a pro (4.5G) as pre-phase for 5G deployment: Closing the gap between technical requirements and network performance," *2016 International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS)*, Marrakesh, pp. 1-7, 2016.
- [45] Ayman Elnashar et al., "Evaluation of LTE-Advanced Features," in *Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT: Paving the way towards 5G*, Wiley, pp.230-263, 2018.
- [46] H. Ji et al., "Overview of Full-Dimension MIMO in LTE-Advanced Pro," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 176-184, February 2017.
- [47] A. Bhamri et al., "Massive carrier aggregation in LTE-advanced pro: impact on uplink control information and corresponding enhancements," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 92-97, May 2016.

- [48] 3GPP TS 36.300 V13.2.0 “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2,” (Release 13), 2016.
- [49] Martin Sauter, "Long Term Evolution (LTE) and LTE-Advanced," in *From GSM to LTE-Advanced: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*, Wiley, pp.235-326, 2014.
- [50] S. K. Routray e K. P. Sharmila, "4.5G: A milestone along the road to 5G," *2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*, Chennai, pp. 1-6, 2016.
- [51] A. Haidine e S. E. Hassani, "LTE-a pro (4.5G) as pre-phase for 5G deployment: Closing the gap between technical requirements and network performance," *2016 International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS)*, Marrakesh, pp. 1-7, 2016.
- [52] V. Ilderem, "1.4 5G Wireless Communication: An Inflection Point," *2019 IEEE International Solid- State Circuits Conference - (ISSCC)*, San Francisco, CA, USA, pp. 35-39, 2019.
- [53] Harri Holma et al., "LTE-Advanced Evolution in Releases 12–13," in *LTE Small Cell Optimization: 3GPP Evolution to Release 13*, Wiley, pp.29-43, 2015.
- [54] P. Kuo, "New physical layer features of 3GPP LTE release-13 [Industry Perspectives]," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 4, pp. 4-5, August 2015.
- [55] V. Saxena et al., "On the Achievable Coverage and Uplink Capacity of Machine-Type Communications (MTC) in LTE Release 13," *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Montreal, QC, pp. 1-6, 2016.
- [56] A. Hoglund et al., "Overview of 3GPP Release 14 Enhanced NB-IoT," in *IEEE Network*, vol. 31, no. 6, pp. 16-22, November/December 2017.

- [57] S. Oh e J. Shin, "An Efficient Small Data Transmission Scheme in the 3GPP NB-IoT System," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 660-663, March 2017.
- [58] W. Yang et al., "Enhanced System Acquisition for NB-IoT," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 13179-13191, 2017.
- [59] M. Chen, et al., "Narrow Band Internet of Things," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20557-20577, 2017.
- [60] A. Ali e W. Hamouda, "On the Cell Search and Initial Synchronization for NB-IoT LTE Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 8, pp. 1843-1846, Aug. 2017.
- [61] Y. -. E. Wang et al., "A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117-123, March 2017.
- [62] J. Xu et al., "Narrowband Internet of Things: Evolutions, Technologies, and Open Issues," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 1449-1462, June 2018.
- [63] T. G. Durand et al, "Evaluation of next-generation low-power communication technology to replace GSM in IoT-applications," in *IET Communications*, vol. 13, no. 16, pp. 2533-2540, 8 10 2019.
- [64] J. Chen et al, "Narrowband Internet of Things: Implementations and Applications," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2309-2314, Dec. 2017.
- [65] X. Lin et al., "Positioning for the Internet of Things: A 3GPP Perspective," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 12, pp. 179-185, Dec. 2017.
- [66] H. Fattah., 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT) (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA. 2018.

- [67] A. Ghosh et al, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019.
- [68] K. Meit et al.,*5G New Radio Fundamentals, procedures, testing aspects*, Rohde & Schwarz, 2019.
- [69] J. Guey et al, "On 5G radio access architecture and technology [Industry Perspectives]," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 2-5, October 2015.
- [70] G. Liu et al, "5G features from operation perspective and fundamental performance validation by field trial," in *China Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 33-50, Nov. 2018.
- [71] J. Sachs et al, "5G Radio Network Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communication," in *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 24-31, March-April 2018.
- [72] D. Hui et al, "Channel Coding in 5G New Radio: A Tutorial Overview and Performance Comparison with 4G LTE," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 60-69, Dec. 2018.
- [73] A. Omri et al, "Synchronization Procedure in 5G NR Systems," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 41286-41295, 2019.
- [74] O. N. C. Yilmaz et al, "Overview of LTE-NR Dual Connectivity," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 6, pp. 138-144, June 2019.
- [75] X. Lin et al., "5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 30-37, September 2019.
- [76] J. Yeo et al, "Advanced Data Transmission Framework for 5G Wireless Communications in the 3GPP New Radio Standard," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 38-43, September 2019.

- [77] T. H. Nguyen et al., "Out of Band Analysis in various 5G-NR Downlink Waveforms with Different Numerologies," *2019 3rd International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*, Hanoi, Vietnam, 2019, pp. 5-9.
- [78] F. Abinader et al., "Impact of Bandwidth Part (BWP) Switching on 5G NR System Performance," *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, Dresden, Germany, pp. 161-166, 2019.
- [79] B. Halvarsson et al., "5G NR Testbed 3.5 GHz Coverage Results," *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, pp. 1-5, 2018.
- [80] F. Hamidi-Sephehr et al., "5G NR PDCCH: Design and Performance," *2018 IEEE 5G World Forum (5GWF)*, Silicon Valley, CA, pp. 250-255, 2018.
- [81] V. Braun et al., "5G NR Physical Downlink Control Channel: Design, Performance and Enhancements," *2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Marrakesh, Morocco, pp. 1-6, 2019.
- [82] Z. Lin, J. Li, Y. Zheng, N. V. Irukulapati, H. Wang and H. Sahlin, "SS/PBCH Block Design in 5G New Radio (NR)," *2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, pp. 1-6, 2018.
- [83] J. Liu et al., "Initial Access, Mobility, and User-Centric Multi-Beam Operation in 5G New Radio," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 35-41, March. 2018.
- [84] E. Peralta, et al., "5G New Radio Base-Station Sensitivity and Performance," *2018 15th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, Lisbon, pp. 1-6, 2018.
- [85] K. Ota, M. Sawahashi and S. Nagata, "Physical Cell ID Detection Probability Using Synchronization Signals for NR Radio Interface Below 6 GHz," *2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*, Singapore, pp. 1-5, 2019.

- [86] N. Patriciello, S. Lagen, L. Giupponi and B. Bojovic, "5G New Radio Numerologies and their Impact on the End-To-End Latency," *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Barcelona, pp. 1-6, 2018.
- [87] F. W. Vook et al., "5G New Radio: Overview and Performance," *2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, pp. 1247-1251, 2018.
- [88] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Technical Specification, "5G; Study on New Radio (NR) access technology", 3GPP TR 138.912 version 15.0.0 Release 15, 2018-09.
- [89] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Technical Specification, "5G NR: Requirements for support of radio resource management", 3GPP TS 38.133 version 15.3.0 Release 15, 2018-10.
- [90] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Technical Specification, "5G NR: Radio Resource Control (RRC) Protocol specification", 3GPP TS 38.331 version 15.3.0 Release 15, 2018-10.
- [91] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Technical Specification, "5G NR; Physical layer measurements", 3GPP TS 38.215 version 15.3.0 Release 15, 2018-10.
- [92] R&S® TSMA6 Autonomous Mobile Network Scanner Datasheet, Rohde & Schwarz website, [online]. Disponível em: <https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/TSMA6_bro_en_5215-8241-12_v0600.pdf>. Acesso realizado em janeiro de 2020.

- [93] Neri. M, “*The Way to 5G and how to test a 5G Network*”, Rohde & Schwarz Mobile Network Testing Application Note, June, 2019.
- [94] E. G. Cristal e S. Frankel, "Hairpin-Line and Hybrid Hairpin-Line/Half-Wave Parallel-Coupled-Line Filters," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no. 11, pp. 719-728, Nov. 1972.
- [95] J. S. Hong e M.J.Lancaster, “ Microstrip Filters for RF/Microwave Applications”, John Wiley & Sons, 2001.
- [96] R. Garg et. Al., “Microstrip Lines and Slotlines”, Artech House Publishers 3rd ed, 2013.
- [97] V.C. Vengin, “Advances in Multi-Band Microstrip Filters”, Cambridge University Press, 2015.
- [98] Taconic Add, “TLX Laminates Datasheet”, Disponível em: <http://www.taconic.co.kr/download/TLX.pdf>, Acesso realizado em Janeiro de 2020.
- [99] Embratel Star One D2, “Embratel aposta no Star One D2 para manter canais de TV na banda C Digital”, Disponível em: <https://teletime.com.br/29/08/2019/embratel-aposta-no-star-one-d2-para-manter-canais-de-tv-na-banda-c-digital/>), Acesso realizado em janeiro de 2020.
- [100] ITU-R, "Studies on compatibility of broadband wireless access systems and fixed-satellite servisse networks in the 3400 – 4200 MHz," ITU-R S.2199, novembro, 2010.
- [101] ANATEL, “Relatório dos Testes de Convivência entre o IMT Operando na Faixa de 3,5 GHz e Sistemas Satelitais Operando em Faixa Adjacente”, Versão 3.0, julho, 2019.
- [102] Nota de aplicação AN 1808 PL32 1809 130625, “Schottky diode mixer for 5.8 GHz radar sensor”, Infineon. Disponível em: <https://www.infineon.com/>), Acesso realizado em janeiro de 2020.

- [103] ITU-R, "Sharing methodology between Fixed Wireless Access Systems in the Fixed Service and Very Small Aperture Terminals in the Fixed- Satellite Service in the 3400 - 3700 MHz Band," ITU-R SF.1486, maio, 2000.
- [104] Anatel Libera Proposta de Maior Leilão Do Mundo de Espectro para 5G, Disponível em: <<http://www.telesintese.com.br/anatel-libera-proposta-de-maior-leilao-do-mundo-de-espectro-para-5g/>> Acesso realizado em fevereiro de 2020.
- [105] Portaria nº 418, de 31 de janeiro de 2020, Diário Oficial da União – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações / Gabinete do Ministro, Disponível em: < <http://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-418-de-31-de-janeiro-de-2020-241105488/>> Acesso realizado em fevereiro de 2020.
- [106] Comitê vê modelo de convivência possível entre 5G e banda C, mas faz ressalvas a leilões futuros, Disponível em: < <https://teletime.com.br/05/02/2020/comite-ve-uso-limitado-da-faixa-adicional-para-5g-e-faz-ressalvas-a-modelo-de-filtros/>> Acesso realizado em fevereiro de 2020.
- [107] Reportagem, “TVs defendem migração da banda C para Ku e calculam custo em R\$ 2,9 bilhões”, Abratel – Associação Brasileira de Rádio e Televisão, Disponível em: < <http://abratel.org.br/clipping-noticia/tvs-defendem-migracao-da-banda-c-para-ku-e-calculam-custo-em-r-29-bilhoes/>>, Acesso realizado em janeiro de 2020.
- [108] Harald Trap Friis , "Noise Figures of Radio Receivers" Proceedings of the IRE, Vol. 32, July 1944, PP.419-422.