

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
TELECOMUNICAÇÕES**

ADEMIR DE JESUS BARBARO

**AMBIENTE DE ENSAIOS OTA (*Over-The-Air*) EM
CÂMARA DE REVERBERAÇÃO APLICADO AO V2x**

CAMPINAS

2020

ADEMIR DE JESUS BARBARO

**AMBIENTE DE ENSAIOS OTA (*Over-The-Air*) EM
CÂMARA DE REVERBERAÇÃO APLICADO AO V2x**

Trabalho de conclusão de curso apresentada como exigência para obtenção do Título de Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Ralph Robert Heinrich

PUC- CAMPINAS

2020

Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia
Faculdade de Engenharia Elétrica e Telecomunicações

Autor: BARBARO, Ademir de Jesus

Título: Ambiente de Ensaio OTA (*Over-The-Air*) em Câmara de Reverberação aplicado ao 5G V2x

Trabalho de conclusão de curso apresentada como exigência para obtenção do Título de Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Ralph Robert Heinrich

1º Examinador Prof. Ralph Robert Heinrich

2º Examinador Prof. Hamilton da Gama Schroder

Campinas, 08 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e oportunidades sem ímpar que me conduziram a trilhar um caminho repleto de aprendizados e ensinamentos que aproximou ainda mais de meus objetivos.

Aos meus pais Delcídio Antônio Barbaro e Maria Magnólia de Jesus por me gerarem, sem eles eu não estaria desfrutando deste momento, minha maior alegria é citá-los aqui e ter a oportunidade de honrá-los.

Aos familiares, por serem inspiração para eu alcançar vitórias e continuar lutando as batalhas desta vida, em especial ao primo Eugênio Luiz Duarte Neto.

Ao Dr. Francisco Luiz Soares Filho por me aconselhar ao longo do curso e me impulsionar a concluir a Engenharia de Telecomunicações.

Aos amigos que conquistei ao longo desta jornada, pelo apoio e por acreditarem em meu potencial e vibrarem pelas minhas conquistas e por serem âncora em momentos difíceis, em especial Ismael Teixeira, Tiago Alves e Victor L. Ramos.

Ao meu orientador Mestre Ralph Robert Heinrich, por ter me acolhido em seu grupo de pesquisa, pelas orientações e ensinamentos compartilhados. Sem dúvidas esse tempo juntos contribuiu para minha formação pessoal e profissional. Aos companheiros de pesquisa do laboratório da PUC Campinas, Eduardo e Daniel, pelo suporte, discussões e ensinamentos compartilhados ao longo da trajetória na faculdade. Ao centro de pesquisa CPQD, pela parceria e por acreditar no projeto, em especial o Roberto Noritaka e Ricardo Minoda.

À faculdade PUC Campinas, por me conceder a oportunidade e estrutura necessária para a obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações. Ao corpo docente da Instituição, pelo conhecimento e ensinamentos compartilhados ao longo da graduação.

À todo corpo docente do ensino fundamental e ensino médio que contribuíram para minha evolução até a conclusão do ensino superior.

Novamente à Deus, o Criador, pois sem Ele, eu não estaria na vida de nenhuma destas pessoas e nenhuma destas na minha.

*“O Senhor é o meu Pastor e nada me
faltará”*

Bíblia Sagrada - Salmos 23.

*“Quanto mais você sobe, mais você tem
que descer”*

Do próprio autor.

RESUMO

BARBARO, Ademir de Jesus. Ambiente de ensaios OTA (Over-The-Air) em Câmara de Reverberação aplicado ao V2x. 2020. 86f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações). Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

Com o advento e mudança de paradigma imposta pela introdução de novas tecnologias destinadas a serviços de telecomunicações de comunicação pessoal e internet das coisas através do 5G e embarcados em veículos através do V2x o presente trabalho apresenta os principais requisitos quanto ao avanço tecnológico, bem como, a gestão do uso do espectro envolvendo pesquisas relacionadas às tendências, às perspectivas e às características das futuras redes de comunicação sem fio. Motivado pela exploração de novos procedimentos simplificados e ótimos para ensaios de qualificação e certificação de dispositivos que operam em frequências *sub-6* e ondas milimétricas desenvolveu-se uma Prova de Conceito (PdC) apoiada no Estado da Arte do uso do espectro, métodos de ensaios OTA (*Over-The-Air*) e as mais variadas aplicações para a caracterizar e definir as condições de contorno de um ambiente de ensaio para dispositivos através de métodos OTA recomendados por organizações de telecomunicações competentes. Um desses ambientes de ensaio é a Câmara de Reverberação, cujo projeto de construção é discutido no decorrer deste trabalho.

Palavras-Chave: 5G, V2x, *sub-6*, ondas milimétricas, OTA (*Over-The-Air*), Câmara de Reverberação.

ABSTRACT

BARBARO, Ademir de Jesus. *OTA (Over-The-Air) testing environment in the Reverberation Chamber applied to V2x*. 2020. 86f. *Course Conclusion Work (Degree in Telecommunication Engineering)*. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

With the advent and change of paradigm imposed by the introduction of new technologies for telecommunications services of personal communication and internet of things through 5G and embarked in vehicles through V2x the present work presents the main requirements regarding the technological advance, as well as, the management of the use of the spectrum involving research related to the trends, perspectives and characteristics of the future wireless communication networks. Motivated by the exploration of new simplified and optimal procedures for qualification and certification testing of devices operating at sub-6 and mmWave frequencies, a State-of-the-Art supported Proof of Concept of spectrum use, Over-The-Air (OTA) testing methods and the most varied applications to characterize it and define the boundary conditions of a testing environment for devices through OTA methods recommended by competent telecommunications organizations was developed. One such test environment is the Reverberation Chamber, whose construction project is discussed in the course of this work.

Keywords: 5G, V2x, sub-6, mmWave, OTA (Over-The-Air), Reverberation Chamber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Evolução das tecnologias celulares.....	17
Figura 02 - Regiões da RR (<i>Radio Regulations</i>).....	18
Figura 03 - Principais mecanismos de propagação	25
Figura 04 - Propriedades do feixe em diferentes distâncias do conjunto de antenas	28
Figura 05 - Arranjo físico para CATR (faixa de teste de antena compacta)	29
Figura 06 - Dimensões e diagrama de radiação da antena dipolo.....	42
Figura 07 - Antena Dipolo Log Periódica.....	45
Figura 08 - Desvio padrão segundo a IEC.....	46
Figura 09 - Faixa de trabalho x Resposta da antena	48
Figura 10 - Caracterização da faixa de medição do sistema.....	50
Figura 11 - Pontos de medida na CR.....	52
Figura 12 - Vistas do cilindro de medidas interno à ZCU e antena de transmissão	52
Figura 13 - Pontos de medição no cilindro de medidas interno à ZCU.....	54
Figura 14 - Gráfico Desvio Padrão x Frequência dos valores medidos com linha de tendência.....	57
Figura 15: Os Segurança em 360° ao redor do veículo com SRR.	62
Figura 16 - <i>Setup</i> de ensaio para medições de TRP e TIS.....	68
Figura 17 - <i>Setup</i> de Ensaio Conduzido.....	80
Figura 18 - <i>Setup</i> de Ensaio Radiado.....	81
Figura 19 - Parede Eixo Z.....	82
Figura 20 - Parede Eixo Y.....	82
Figura 21 - Parede Eixo X.....	83
Figura 22 - Agitador de Modos.....	83

LISTA DE IMAGEM

Imagem 01 - <i>Setup</i> de caracterização da antena.....	47
Imagem 02 - Montagem da câmara de reverberação.....	49

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Faixas de frequências 5G	19
Tabela 2 - Distância estimada do campo distante e perda de caminho para diferentes aberturas radiantes	28
Tabela 3: Lista de materiais para construção da CR.....	42
Tabela 4 - Incerteza associada a medida no processo de abertura e fechamento da tampa.....	55
Tabela 5 - Resultados de verificação da conformidade com a norma IEC 61000-4-21.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
2,5G	Segunda Geração e Meia
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
GSM	Sistema Global de Comunicações Móveis
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicações Móveis
BALUN	<i>Balanced to Unbalanced</i>
LGT	Lei Geral de Telecomunicações
ERB	Estação Rádio Base
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
SMP	Serviço Móvel Pessoal
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle to Everything</i>
OTA	<i>Over-The-Air</i>
PdC	Prova de Conceito
DUT	Devices Under Test
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
RAN	Radio Access Network
SA	<i>Space Attenuation</i>
RAMs	<i>Radio Frequency Absorbing Materials</i>
NSA	<i>Non-Uniform Space Attenuation</i>
FU	<i>Field Uniform</i>
SVSWR	<i>Site Voltage Standing Wave Ratio</i>
CR	Câmara de Reverberação
CA	Câmara anecóica
LUF	<i>Lowest Usable Frequency</i>

SRs	<i>Stirrer Rate</i>
Fator K	<i>Rician K-factor</i>
SISO	<i>Single Input - Single Output</i>
MIMO	<i>Multiple input - Multiple output</i>
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
AoD	<i>Angle of Departure</i>
DS	<i>Delay Spread</i>
SCM	<i>Spatial Channel Model</i>
BS	<i>Base Station</i>
SCME	<i>Spatial Channel Model Extension</i>
UEs	<i>User Equipment</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>
EM	<i>Electromagnetic</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
DFF	<i>Direct Power Field</i>
IFF	<i>Indirect far-field method</i>
CATR	<i>Compact Antenna Test Range</i>
NFTF	<i>Near-field to Far-field Transform</i>
RIMP	<i>Rich Isotropic Multipath Environment</i>
TRP	<i>Total Radiated Power</i>
TRS	<i>Total Reference Sensitivity</i>
TIS	<i>Total Isotropic Sensitivity</i>
CTIA	<i>Cellular Telecommunications Industry Association</i>
SCME	<i>Spatial Channel Model Extension</i>
mmWave	<i>millimeter Waves</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
NR	<i>New Radio</i>
MFU	<i>Mínima Frequência Utilizável</i>
PR	<i>Potência recebida</i>
PT	<i>Potência Transmitida</i>

ZCU	Zona de Campo Uniforme
CRR	Cavidade Ressonante Retangular
LPDA	<i>Log-Periodic Dipole Array</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
CTIA	<i>Cellular Technology and Internet Association</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	21
2.1. Objetivos Gerais	21
2.2. Objetivos Específicos	21
3. ESTADO DA ARTE	21
3.1. Propostas de ambientes de teste OTA	21
3.2. Cenário de ensaios OTA	27
3.3. Cenário de ensaios SISO OTA	31
3.4. Cenário de ensaios MIMO OTA	32
3.5. Produtos comerciais para testes de qualificação e certificação	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1. Proposta de Método para execução da PdC	36
4.2. Implementação de uma PdC de CR	36
4.2.1. Mínima Frequência Utilizável (MFU) e Fator de Qualidade (Q)	36
4.2.2. Dimensionamento Físico da CR	38
4.2.3. Agitador de Modos	40
4.2.4. Antenas	41
4.2.5. Orçamento e Materiais da CR	42
4.3. Adequação do método proposto	43
4.3.1. Ajuste dos pontos de medições na ZCU	43
4.3.2. Alteração de tipo de antena utilizada	43
4.3.3. Adequação de cálculo do desvio padrão	45
5. DESENVOLVIMENTO E TESTES	47
5.1. Caracterização das Antenas	47

5.2. Caracterização da CR	48
5.2.1. Montagem da CR	48
5.2.2. Operação e testes iniciais da CR	49
5.2.3. ZCU de trabalho e Planos de Medição	51
6. RESULTADOS	55
7. APLICAÇÃO AO V2x - comunicação (Vehicle to Vehicle)	59
7.1. Da comunicação através de serviço automotivo V2V	59
7.2. Da Arquitetura e tecnologia V2V	61
7.3. Da recomendação de faixas de frequências	64
7.4. Do escopo de ensaios aplicáveis às comunicações V2V	66
7.5. Dos métodos de ensaios aplicáveis em CR	67
7.5.1. TRP e TIS	67
7.6. Dos impactos dos requisitos de ensaios e normas disponíveis	69
7.7. Da definição de FoM (Figura de Mérito) em ensaios V2V OTA	70
8. CONCLUSÕES	71
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
10. BIBLIOGRAFIA ADICIONAL	77
APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DE ENSAIOS	80
APÊNDICE B - PROJETO DA CR	82
ANEXO A - PRODUTOS COMERCIAIS E DEMANDA PARA ENSAIOS OTA	84

1. INTRODUÇÃO

Segundo a Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997 (Lei Geral de telecomunicações - LGT), o espectro de radiofrequências é um recurso limitado, constituindo-se um bem público e utilizado para serviços de radiocomunicação administrado pela Anatel.

Na administração do espectro de radiofrequências, são observadas as atribuições das faixas, definidas em tratados e acordos internacionais, aprovados na União Internacional de Telecomunicações - UIT, e, anualmente, é emitido o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências (PDFF) no Brasil, o qual contém o detalhamento do uso das faixas de radiofrequências associadas aos diversos serviços e atividades de telecomunicações. (ANATEL, Agência Nacional de Telecomunicações, 2019).

A Anatel é responsável pela elaboração de atos normativos de atribuição, destinação e condições de uso de faixas de frequências. As condições de uso de radiofrequência e as normas gerais observadas pela Anatel, estão contidas na Resolução nº 671, de 3 de novembro de 2016 que aprova no Anexo I, o Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências.

A Anatel zela pelo uso do espectro através da canalização e condições específicas de uso de radiofrequências, conforme a compatibilidade com a atividade ou serviço a ser explorado, particularmente no tocante à potência, à largura de faixa ocupada e à técnica empregada, sendo que para especificar ou complementar o que está disposto na Resolução nº 671, a Anatel pode editar regulamentos de canalização e condições específicas de uso de radiofrequências.

Além disso, a Anatel assegura o bom uso do espectro realizando a fiscalização do uso de radiofrequências através de inspeção técnica nas instalações das estações e através de sistemas de monitoramento e gestão à distância. Como também, do regulamento de Certificação e Homologação de produtos de telecomunicações aprovado pela Resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019 assegura o uso de radiofrequências buscando garantir principalmente a:

I - proteção e segurança dos usuários dos produtos para telecomunicações;

II - atendimento aos requisitos de segurança, de compatibilidade eletromagnética, de proteção ao espectro radioelétrico e de não agressão ao meio ambiente;

III - uso eficiente e racional do espectro radioelétrico;

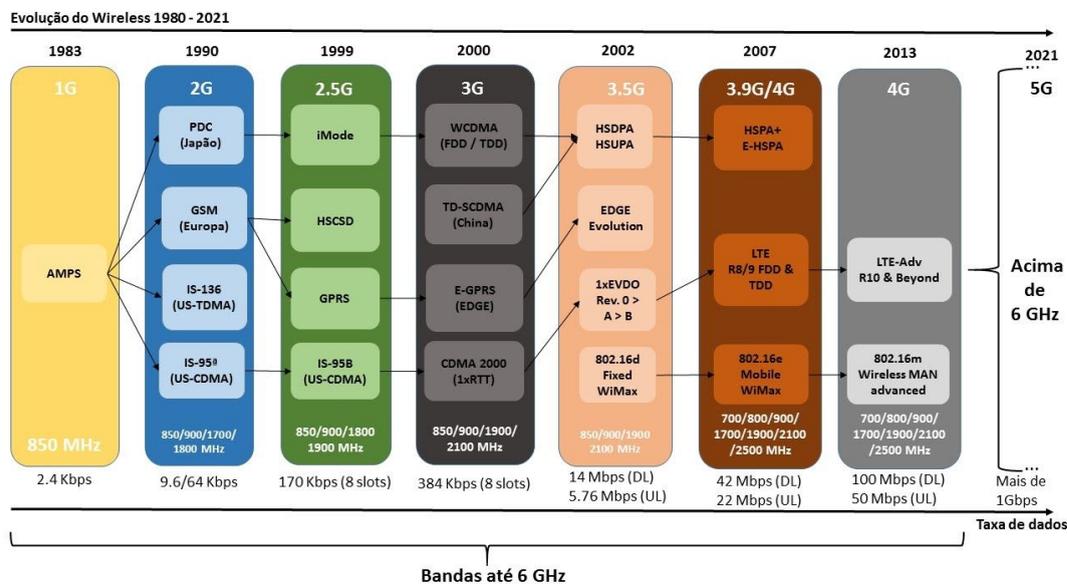
IV - compatibilidade, operação integrada e interconexão entre as redes;

V - acesso dos consumidores a produtos diversificados, com qualidade, e regularidade adequados à natureza dos serviços e aplicações aos quais os produtos se destinam;

(Anatel, Resolução nº 715, 2019).

Dentro do sistema de certificação e homologação existem procedimentos realizados em laboratórios devidamente acreditados e aptos a executar ensaios para a avaliação da conformidade, conforme previsto nas normas técnicas expedidas pela Anatel. Sendo que há requisitos técnicos destinados ao uso de serviços de radiocomunicação, Serviço Móvel Pessoal (SMP) e serviços de comunicação automotivo.

O SMP é um serviço de radiocomunicações que faz uso de segmento específico do espectro e desde o seu surgimento tem passado por um processo de evolução, seja por alocação e ampliação do espectro ou por aumento de cobertura e taxa de transmissão. Na Figura 01 é possível verificar a evolução das tecnologias destinadas ao uso do SMP.

Figura 01 - Evolução das tecnologias celulares¹

No entanto, toda evolução apresentada conforme a Figura 01 nos últimos 30 anos vive hoje uma mudança de paradigma, segundo Conceição [5]. Bilhões de usuários conectados reforça a necessidade de ampliar a capacidade de transmissão por terminal atendido, bem como ampliar a capacidade da rede quanto ao número de terminais atendidos simultaneamente, o atendimento da infraestrutura de suporte à Internet das Coisas, Mobilidade Urbana e a indústria como um todo, com baixa latência a alta disponibilidade. Surge então, a Quinta Geração (5G) e para atender toda esta demanda novas faixas de frequências com largura de banda compatível com as taxas de transmissão propostas foram alocadas para o novo padrão.

Além disso, as aplicações destinadas à comunicação de serviço automotivo, o V2X (*Vehicle to Everything*), que tem como objetivo o uso em veículos automotores e no interesse da segurança rodoviária, bem como radares de curto e longo alcance com sistema anti-colisão exigem largura de banda compatível e velocidade de comunicação devido a criticidade da aplicação.

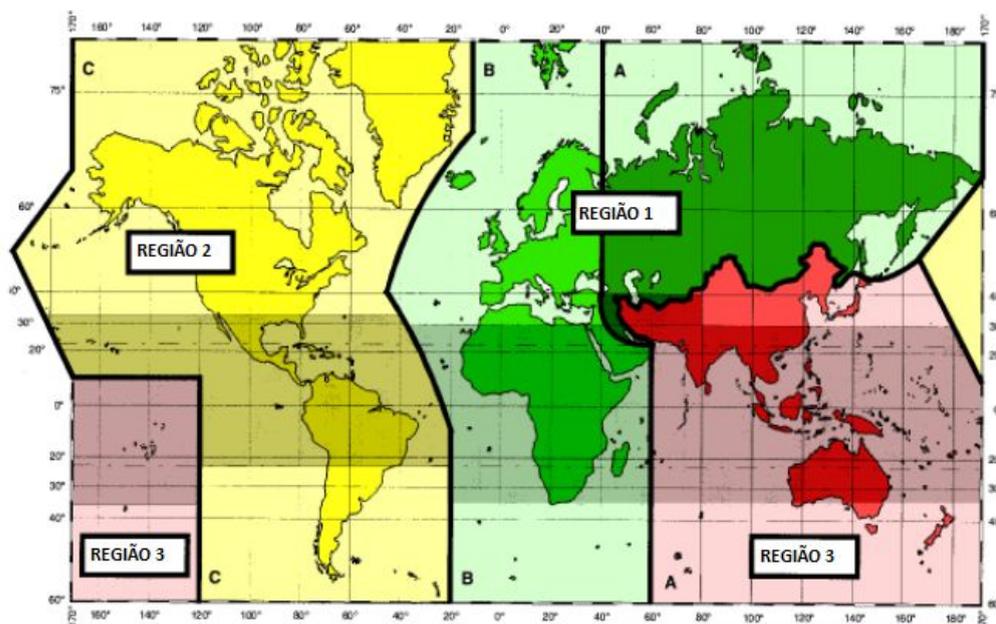
¹ 2G / 2.5G - Segunda geração de tecnologias para telefonia móvel

3G / 3.5G / 3.9G - Terceira geração de tecnologias para telefonia móvel

4G - Quarta geração de tecnologias para telefonia móvel

Mediante a todo este cenário, a UIT-R² atua para auxiliar com apontamentos para uso do espectro. As faixas alocadas para o 5G são divididas em dois blocos delimitados pela faixa de 6 GHz, sendo que, são nomeadas de *sub-6* e *above-6*. As 3 regiões ao redor do mundo são indicativas para as recomendações de alocação do espectro para o 5G. As regiões podem ser vistas na Figura 02.

Figura 02 - Regiões da RR (*Radio Regulations*)



Fonte: [6]

Segundo recomendação da UIT-R [7] e de acordo com as regiões, as faixas de frequências são as descritas na tabela 1:

² A União Internacional de Telecomunicações (UIT) (em francês: *Union internationale des télécommunications*; em inglês: *International Telecommunication Union*) é a agência da ONU especializada em tecnologias de informação e comunicação. Destinada a padronizar e regular as ondas de rádio e telecomunicações internacionais, a agência é composta por todos os 193^[1] países membros da ONU^[2] e por mais de 700 entidades do setor privado e acadêmico. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/União_Internacional_de_Telecomunicações>. Acesso em: 07 nov. 2020.

Tabela 1 - Faixas de frequências 5G

	REGIÃO 1	REGIÃO 2	REGIÃO 3
Baixas (MHz)	700	600, 700, 800, 900;	
Médias (GHz)	2, 3,3-3,8, 4,4-4,5, 4,8-4,9;	2,3, 2,5, 3,4-3,6, 3,7-4,2;	1,4, 2,6, 3,3-3,8, 3,9-4,2, 4,4-5;
Altas (GHz)	26, 40, 66-71;	24-28, 32, 37, 38, 39, 40, 42, 45-50, 50-52, 64-76, 81-86, 95;	24, 26, 27-28,2, 29,1-29,5;

Fonte³

Já em relação ao V2X, especificamente a comunicação V2V (*Vehicle to Vehicle*), conforme a ETSI⁴ [8], a faixa de 76-81 GHz é também designada para estas aplicações.

No Brasil, segundo o MCTIC [9], foram destinadas às faixas 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz, sendo esta última em comprimento de onda milimétrico, para aplicações do 5G. E para a tecnologia V2X (*Vehicle to Everything*) a faixa destinada a comunicação e protocolos está situada como ISM em 5,9 GHz.

A disrupção nas telecomunicações embasada na eminente demanda em atender às novas necessidades de usuários fazem com que o uso de espectro de radiofrequências seja ampliado para frequências acima de 25 GHz onde encontram-se as as faixas de frequência definidas como ondas milimétricas.

³ Disponível em: <<https://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/sessaoPublica/arquivos/estrategia5g/Documento-base-da-Estrategia-Brasileira-de-5G.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2020

⁴ O *European Telecommunications Standards Institute* é um instituto europeu cujo objetivo é definir padrões que permitam ao mercado europeu funcionar como um todo ao nível das telecomunicações. Formado pela Comissão Europeia em 1998, inclui fabricantes e operadores. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/European_Telecommunications_Standards_Institute>. Acesso em: 07 nov. 2020.

Esta faixa do espectro, até os dias atuais pouco utilizada, é a premissa principal do problema a ser resolvido, no que diz respeito a realização de ensaios em dispositivos operando em frequências com comprimento de onda milimétrico. Isso dificulta a realização de ensaios, sejam estes, de desenvolvimento de produto ou até mesmo a fim de garantir certificação e homologação destes dispositivos.

Os procedimentos de ensaios e medição necessários para certificação da infraestrutura e dos terminais aplicados ao SMP existentes atualmente, compreendem a faixa sub-6 do espectro, onde parte destes procedimentos contemplam ensaios realizados de forma conduzida e outra parte dos ensaios radiados, conforme Apêndice A. Os procedimentos de terminais operando com tecnologia V2V seguem a mesma linha de raciocínio de ensaios aplicáveis ao 5G.

O ensaio de forma conduzida é inviabilizado devido a perdas na conectorização e também em virtude do alto custo deste material, bem como a dificuldade de utilizar conectores e cabos com frequências operando em ondas milimétricas.

Analogamente, o ensaio de forma radiada realizado em uma Câmara Anecóica (CA) é inviabilizado devido às suas características, pois não consegue simular de forma realista, os problemas que porventura venham a acontecer em um ambiente real, para dispositivos operando em ondas milimétricas.

Considerando a necessidade de adequação às novas realidades de prestação dos serviços de telecomunicações, especialmente em decorrência do avanço tecnológico crescente dos produtos para telecomunicações há o desafio do desenvolvimento de procedimentos e dispositivos ótimos, simplificados, que permitam a realização de ensaios com tempo de *set-up* mínimos, promovendo ensaios rápidos e de baixo custo. Esse ambiente de ensaios é mais adequado e compatível com os novos dispositivos de comunicação pessoal, de internet das coisas e embarcados em veículos autônomos.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivos Gerais

Caracterizar e definir as condições de contorno para o desenvolvimento completo de um ambiente de ensaio para dispositivos móveis que atendam aos requisitos da 5ª geração de sistemas móveis (5G) e para outros dispositivos que demandem técnicas OTA – *Over-The-Air* para a realização de ensaios de qualificação e certificação.

2.2. Objetivos Específicos

Definição de características mecânicas e eletromagnéticas (antenas, sub-refletores, conectores, blindagens, etc.) e elaboração de PdC – Prova de Conceito aplicável para caracterização e qualificação da demanda, no curto, médio e longo prazos, que ocasionam ensaios OTA para dispositivos (Cronograma, faixas de frequência, aplicações, ensaios e requisitos internacionais e nacionais) e das técnicas de ensaios OTA em suas diferentes modalidades, em função das faixas de frequência, dos dispositivos e suas aplicações.

3. ESTADO DA ARTE

3.1. Propostas de ambientes de teste OTA

Com a evolução dos padrões de comunicação tornou-se necessário o desenvolvimento de novos métodos de caracterização para os sistemas de comunicação sem fio e seu ambiente de propagação, dentre as principais características destes ambientes tem-se a forma como a onda eletromagnética se propaga e interage com o meio, geralmente essa interação possui características de múltiplos percursos que afetam a qualidade do sinal recebido

por meio dos atrasos gerados devido ao espalhamento (*delay spread*), interferência entre símbolos, efeito doppler, entre outros.

Assim, a demanda para avaliar, com medições padronizadas, o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio, dando acesso aos fatores de mérito dos dispositivos em teste (DUT - *Devices Under Test*) levam a necessidade de um ambiente realista, com métodos de emulação de canais capazes de recriar o ambiente de múltiplos percursos de forma controlada, para que se possam coletar dados para avaliação do seu desempenho, que deve atender aos requisitos mínimos para um determinado mercado, esse método de avaliação é chamado OTA.

Existem três modalidades que se destacam na avaliação do desempenho de sistemas OTA surgidas da *3rd Generation Partnership Project* (3GPP⁵) e RAN 4⁶, são as câmaras anecóicas, câmaras de reverberação independentes e câmaras isotrópicas móveis com emuladores de canal que serão detalhadas a seguir e conforme aponta Wright [10].

Câmaras Anecóicas: Uma câmara anecóica é utilizada para emular o espaço livre, nenhuma onda de rádio é refletida nas paredes, teto e piso. Utiliza-se a CA, pois é necessário um espaço livre ideal para a medição eletromagnética em um ambiente externo que não é afetado pelo clima e pela interferência fora da câmara, portanto, resultados repetíveis podem ser obtidos. Para caracterizar o desempenho de uma CA são usadas as seguintes figuras de mérito:

- Atenuação do local (SA - *Space Attenuation*) para toda a CA (todas as paredes são cobertas com Materiais Absorvedores de Radiofrequência - RAMs);

⁵ 3rd Generation Partnership Project é uma organização tecnológica do ramo de telecomunicações que visa padronizar a criação, envio e reprodução de arquivos multimídia (vídeos) em telefones celulares e outros aparelhos wireless GSM. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/3GPP>>. Acesso em: 07 nov. 2020.

⁶ O grupo RAN 4 (*Radio Access Network*) da 3GPP é responsável pelo desenvolvimento de especificações que tratam de *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) / *Evolved UTRAN* (E-UTRAN)

- Atenuação no local não-uniforme (NSA - *Non-Uniform Space Attenuation*) para uma semi-CA (sem RAMs no chão);
- Uniformidade de campo (FU - *Field Uniform*);
- Relação de onda estacionária de tensão no local (SVSWR - *Site Voltage Standing Wave Ratio*);

Câmaras de reverberação: são ambientes altamente reflexivos, onde sinais de múltiplos percursos preenchem a câmara com ondas estacionárias, que são agitadas mecanicamente para expor o DUT a uma distribuição deste ambiente de propagação altamente variável. Ao obter muitas amostras, a resposta estatística do DUT a esse ambiente reflexivo pode ser caracterizada, o desempenho da CR não é sensível ao formato da cavidade, quando esta é eletricamente grande, pois o número de modos não é sensível ao formato, mas sim ao volume da cavidade.

Assim como em uma CA existem muitos parâmetros úteis para caracterizar o desempenho de uma CR, as seguintes figuras de mérito podem ser usadas:

- Uniformidade de Campo: descreve como o campo é uniforme em uma CR, mas deve-se ter em mente que o campo nunca poderá ser uniforme por causa da ressonância e das ondas estacionárias. Em uma CR a palavra uniforme significa estatisticamente uniforme. A uniformidade de campo é definida como o desvio padrão de um valor médio normalizado e do valor máximo normalizado do campo eletromagnético, em cada uma das posições dos agitadores durante um giro completo.
- Menor Frequência Utilizável (LUF - *Lowest Usable Frequency*): definida como a frequência em uma câmara que atende aos requisitos da uniformidade de campo. Na prática o modelo do agitador e o fator de qualidade da câmara afetam a LUF, assim para diferentes CRs a LUF pode ter valores empíricos diferentes. Deve-se notar que a definição da LUF pode depender da aplicação da câmara.

- Coeficiente de Correlação e Número de Amostras Independentes: é um importante parâmetro em uma medida na CR, a maioria das quantidades medidas têm significados estatísticos, raramente adquire-se apenas uma única amostra em um ambiente estatístico.
- Proporção de Agitação: a taxa de agitação (SRs - *Stirrer Rate*) é definida como a proporção entre a máxima amplitude e a mínima amplitude de dados coletados durante um ciclo do agitador.
- Fator K: o fator K (*Rician K-factor*) é definido como uma taxa entre a potência direta e a potência dos modos reverberados na câmara em modo direto. Da perspectiva do canal de comunicação, quando $K=0$, o canal é um canal de Rayleigh (*Rayleigh Fading*). Quando $K=\infty$, o canal é um canal non-fading (*Gaussian channel*).

Câmaras isotrópicas: fornecem um ambiente multipercurso tridimensional completamente isotrópico, com controle total sobre as condições de canal, bem como a capacidade de testar com modelos estatísticos de canais. .

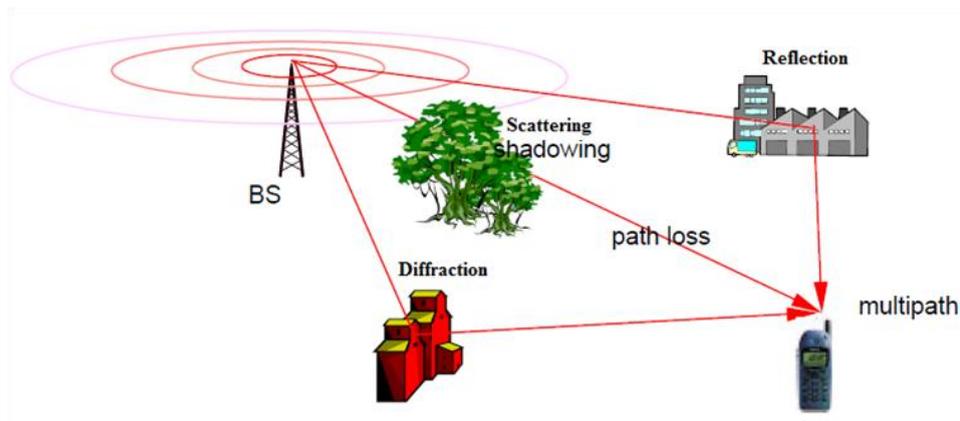
Segundo a definição do livro *Anechoic and Reverberation Chamber* [11], câmaras anecóicas e câmaras de reverberação são dois tipos muito diferentes de instalações de medição interna, com fenômenos opostos, que compartilham quantidades físicas e expressões matemáticas. Uma CA é baseada na teoria determinística e a CR fundamentada na teoria estatística, e existem semelhanças que podem ser encontradas nos fenômenos de absorção e dispersão.

Para definição do tipo de ambiente deve ser levado em conta qual será o cenário emulado, além das características da arquitetura dos dispositivos, se estes são SISO - *Single Input - Single Output* ou MIMO - *Multiple input - Multiple output* e que será o modelo de canal utilizado.

Testar o dispositivo, como este opera normalmente, é a melhor forma de entender o desempenho que será experimentado pelo usuário, os diferentes ambientes, como interno, externo, rural, urbano, móvel ou altamente móvel, nômade, formam o conjunto básico para o qual deve-se testar os dispositivos.

De acordo com Aarsalane [12], em um ambiente real, a transmissão de um sinal geralmente é feita sobrepondo, além de um possível multi percurso direto, outras perdas de percurso devido a propagação. Esses múltiplos percursos têm um número variável e sofrem efeitos diferentes, dependendo da natureza da interação entre a onda e os elementos do ambiente. O sinal obtido na antena receptora corresponde à recombinação dessas ondas, que sofreram um desvanecimento (*fading*) e rotação de fase diferente, e que chegam ao receptor com um atraso devido ao comprimento do percurso de propagação. A presença de múltiplos percursos de propagação pode levar a uma distorção significativa do sinal recebido. A Figura 03 ilustra o conceito de múltiplos percursos e os principais fenômenos de propagação.

Figura 03 - Principais mecanismos de propagação



Fonte: [12]

Devido às características das interações que as ondas de rádio têm com o ambiente de propagação, as variações de canal mudam constantemente e sendo assim os modelos de canais podem ser divididos em duas categorias, conforme Aarsalane [12].

- Modelo de canal físico: descreve o ambiente de propagação a partir de uma abordagem eletromagnética. O canal de propagação bidirecional que conecta as posições do transmissor e receptor é descrito pela teoria de propagação de ondas eletromagnéticas. Assim, são parâmetros quantificados intrínsecos ao canal físico como ângulo de chegada (AoA - *Angle of Arrival*), (DS - *Delay Spread*), amplitude complexa ou ângulo de

partida (AoD - *Angle of Departure*). Esse tipo de modelo de canal independe de parâmetros como padrão de radiação da antena e número de antenas.

- Modelo de canal analítico: caracterizam a resposta ao impulso (equivalente, a função de transferência) do canal entre as antenas individuais de transmissão e recepção de maneira matemática/analítica, sem explicitamente contabilizar a propagação de ondas. As respostas de impulso individuais são incluídas em uma matriz de canal (MIMO). Modelos analíticos podem ser subdivididos em modelos de propagação e modelos baseados em correlação.

Além dos dois modelos acima, a 3GPP em sua Especificação: 36.873, propôs a família de modelos de canais espaciais (SCM - *Spatial Channel Model*), que apresenta três cenários distintos para reprodução das condições de uso experimentadas em situações reais:

- "Macro célula urbana" corresponde ao cenário em que o equipamento do usuário está localizado em um ambiente reflexivo (urbano), a uma certa distância da BS - *Base Station*.
- "Célula macro suburbana" corresponde ao caso em que o equipamento do usuário está localizado em um cenário não reflexivo (suburbano ou rural), com presença de componentes da linha de visão.
- "Microcélula urbana" corresponde ao caso em que o equipamento do usuário está localizado em um cenário reflexivo e está sendo atendido por uma BS localizada a uma curta distância dele. Além do SCM, tem-se o modelo de canal especial estendido (SCME - *Spatial Channel Model Extension*), que sugere a extensão de alguns dos parâmetros propostos anteriormente. Esse modelo propõe adicionar DS nos multi percursos seguindo uma função exponencial unilateral.

E por fim os modelos de canal Winner, que são uma série de modelos de canal estendido (3GPP-SCM) para ambientes "externos" e IEEE⁷ 802.11

⁷ O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou IEEE (pronuncia-se I-3-E, ou, conforme a pronúncia inglesa, *eye-triple-e*) é uma organização profissional sem fins lucrativos, fundada nos Estados Unidos. Disponível em:

para ambientes "internos". É considerado na literatura como o modelo de canal mais bem-sucedido. Este modelo pertence à família de modelos geométricos e estocásticos, descrevendo o canal de propagação como uma fonte de percursos agrupados em clusters, conforme dito em Arsalane [12].

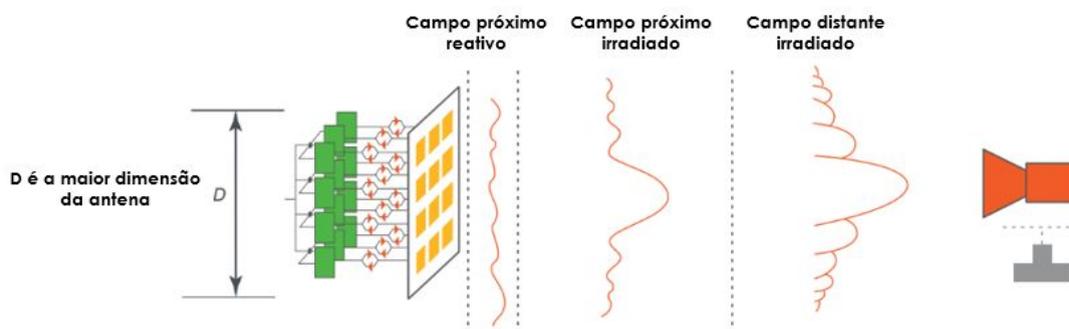
3.2. Cenário de ensaios OTA

Em ensaios com cabos, as propriedades físicas do sistema após calibradas apresentam estabilidade e proporcionam ensaios precisos e com resultados repetíveis, já quando se fala em ondas milimétricas, a calibração de tais propriedades torna-se complexa e muito demorada, pois a perda excessiva devido aos multi percursos torna medições precisas em testes OTA uma tarefa complexa.

Os ensaios atendem as necessidades do ciclo de desenvolvimento dos produtos. O ensaio de conformidade é um ponto crítico, pois todos os dispositivos, desde estações base até os UEs - *User Equipment* devem passar por eles antes de serem comercializados no mercado. Os testes de conformidade da 3GPP RAN-4 são divididos em RF (Radiofrequência), RRM (Gerência de Recursos de Rádio) e demodulação e testes de sinalização.

Os ensaios OTA geralmente são realizados nas regiões de campo próximo ou campo distante do conjunto de antenas e as características da onda eletromagnética transmitida (EM - *Electromagnetic*) mudam dependendo da distância do transmissor. Ao ser propagado a partir da matriz da antena, o sinal se torna mais desenvolvido. Na Figura 04, a amplitude dos picos, lóbulos laterais e nulos do padrão de radiação evolui em direção ao padrão de campo distante.

Figura 04 - Propriedades do feixe em diferentes distâncias do conjunto de antenas



Fonte: [13]

Segundo a Keysight [13], devido à natureza das ondas irradiadas, a distância do campo distante e a perda de percurso associada aumentam com a frequência. Por exemplo, a região de campo distante de um sinal em LTE⁸ com antena de alguns cm operando em 2 GHz começa em 0,3 metros e tem uma perda de percurso de 28 dB. Já um sinal de 5G NR operando em 28 GHz terá uma distância de campo distante de 4,2 metros e uma perda de percurso de 73 dB, isso resultará em uma câmara de ensaio de campo distante excessivamente grande além de uma perda de percurso elevada para fazer medições precisas e repetíveis nas frequências acima de 28 GHz.

A distância também aumenta à medida que a antena de origem aumenta, aumentando ainda mais o tamanho e a perda de percurso, conforme Tabela 2:

Tabela 2 - Distância estimada do campo distante e perda de caminho para diferentes aberturas radiantes

Tamanho D (cm)	2 GHz Distância (m) Perda do Caminho (dB)	28 GHz Distância (m) Perda do Caminho (dB)	43 GHz Distância (m) Perda do Caminho (dB)
10	0,13 m 21 dB	1,87 m 66 dB	2,87 m 74 dB
15	0,30 m 28 dB	4,2 m 73 dB	6,4 m 81 dB

⁸ LTE - *Long Term Evolution* é um padrão de redes de comunicação móveis que surgiu como uma evolução da 3ª geração

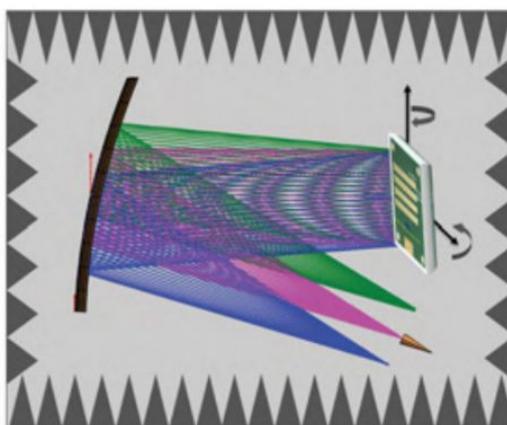
20	0,53 m 33 dB	7,4 m 78 dB	11,4 m 86 dB
----	-----------------	----------------	-----------------

Fonte: [13]

Segundo a 3GPP [14], até o momento foram aprovados três métodos de ensaio RF para desempenho OTA, para estação base e UEs. No método campo direto (DFF - *Direct Power Field*), o dispositivo a ser testado é posicionado em uma estrutura que gira em azimute e elevação, permitindo a medição em qualquer ângulo como uma esfera 3D. Esse método pode executar os inúmeros testes incluindo os mais abrangentes que medem vários sinais. No entanto, requer uma câmara de teste maior para ondas milimétricas. Por sua capacidade de medir vários sinais, esse é o principal método para dispositivos abaixo de 6 GHz.

O método de ensaio IFF (*Indirect far-field method*) é baseado em um CATR (*Compact Antenna Test Range*), que usa um refletor parabólico para colimar os sinais transmitidos pela antena da sonda e criar um ambiente de teste de campo distante, conforme Figura 05. O método é limitado à medição de um único sinal, fornece uma distância e perda de percurso menores que o método DFF para medir dispositivos operando em ondas milimétricas.

Figura 05 - Arranjo físico para CATR (faixa de teste de antena compacta)



Fonte: [13]

E por fim o método de transformação de campo próximo para campo distante (NFTF - *Near-field to Far-field Transform*), que considera a fase e a

amplitude do campo elétrico na região de campo próximo e usa operações matemáticas para prever o padrão de campo distante. Embora este seja um método compacto e de baixo custo, está sujeito à interferência do transmissor que afeta a precisão da medição. Também é limitado a medições de linha de visada única.

O objetivo do ensaio é obter um desempenho comparável entre o campo e o laboratório.

Segundo Chen [15], a CR seria uma ótima solução, pois emula um ambiente isotropicamente rico em multipercursos (RIMP - *Rich Isotropic Multipath Environment*), onde representa canais independentes, se as portas das antenas estiverem desacopladas.

Atualmente uma CR pode ser utilizada para ensaios de medição de antena, bioeletromagnética, emulação de canal de rádio de medição espacial, entre outras aplicações.

Como pode ser visto em Quian *et al* [11], muitos fatores podem influenciar na escolha da forma de uma CR, por exemplo o volume de trabalho que depende do tamanho dos agitadores, para minimizar o acoplamento direto pode-se adicionar dispersões extras ou envolver mais métodos de agitação. Em geral a forma retangular tem sido a principal escolha e dentre os fatores que afetam a decisão da forma de uma CR, tem-se:

- A menor frequência utilizável: depende do número de modos de excitação de campo.
- Volume de Trabalho: depende da aplicação da CR e essa margem deve ser pelo menos $\lambda/4$, ou $\lambda/2$ mais estritamente, a partir do limite da RC.
- Fator Q: relação entre a potência sem agitadores e a potência com agitadores.
- Design do agitador: tamanho, forma e demais características que serão intrínsecas ao agitador que comporá a câmara.

3.3. Cenário de ensaios SISO OTA

A transmissão SISO - *Single Input - Single Output* é a estrutura de enlace de rádio tradicional usada entre transmissor e receptor com antena em cada um, somente um fluxo espacial é transmitido. Exemplos dessa estrutura seriam os padrões celulares existentes, por exemplo, Sistema Global de Comunicações Móveis (GSM⁹) e Sistema Universal de Telecomunicações Móveis (UMTS¹⁰).

Para dispositivos que suportam apenas transmissão SISO, a medição OTA tradicional concentra-se na eficiência da radiação da antena, conforme CTIA [16]. Duas figuras de mérito foram escolhidas para o sistema SISO OTA: potência total irradiada (TRP - *Total Radiated Power*) e sensibilidade total de referência (TRS - *Total Reference Sensitivity*), também conhecida na CTIA¹¹ como sensibilidade isotrópica total (TIS - *Total Isotropic Sensitivity*). A métrica TRP é obtida calculando a média da potência irradiada em uma esfera centralizada no dispositivo em teste (DUT). A métrica TRS é a média na mesma esfera da potência mínima recebida para obter uma taxa de erro de bit específica. Essa medição do receptor é feita enquanto o DUT está transmitindo na potência máxima, para que todos os efeitos irradiados que possam causar auto-bloqueio ou dessensibilização do receptor DUT sejam totalmente capturados, conforme Rumney *et al* [17].

A diferença fundamental entre o desempenho SISO e MIMO é o canal de propagação de rádio. Para o SISO, o desempenho do DUT é independente do canal, definido como isotrópico e sem desvanecimento. A isotropia é

⁹ Sistema Global de Comunicações Móveis (GSM) é uma das tecnologias de segunda geração dos tecnologia móvel.

¹⁰ Sistema Universal de Telecomunicações Móveis (UMTS) é uma das tecnologias de terceira geração dos tecnologia móvel.

¹¹ CTIA *The Wireless Association* é uma associação comercial que representa a indústria de comunicações sem fio nos Estados Unidos. A associação foi estabelecida em 1984 e está sediada em Washington, DC. É uma organização sem fins lucrativos e representa operadoras e fornecedores sem fio, fabricantes e provedores de produtos e serviços sem fio. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/CTIA_\(organization\)](https://en.wikipedia.org/wiki/CTIA_(organization))>. Acesso em: 07 nov. 2020.

alcançada na câmara anecóica através da média de muitas medições feitas a partir de um único ângulo de chegada (AoA)/partida (AoD) e na câmara de reverberação pelo domínio do tempo que calcula a média dos ângulos aleatórios de chegada/partida causados pela dispersão dos modos.

O ambiente isotrópico é necessário para avaliar TRP e TIS, mas é totalmente inadequado para avaliar o desempenho de multiplexação espacial de dispositivos que utilizam técnicas com mais de uma entrada/saída.

3.4. Cenário de ensaios MIMO OTA

A técnica MIMO implica em um transmissor e um receptor com múltiplas antenas. A principal característica da transmissão MIMO é que ela explora os aspectos espaciais do canal. No início das comunicações celulares, o desvanecimento e a perda de percurso do canal de banda estreita foram os parâmetros principais. Para comunicações modernas de banda larga, a seletividade de frequência do canal é um importante parâmetro e segundo Rumney *et al* [17], para que a multiplexação espacial mostre qualquer ganho em relação ao SISO, a operação exige que os sinais recebidos por cada antena DUT sejam suficientemente diferentes para que o receptor DUT possa decodificar os fluxos de dados individuais. Em um ambiente isotrópico, os sinais recebidos por cada antena serão os mesmos e nenhum ganho de multiplexação espacial será possível. Assim, para avaliar o desempenho da multiplexação espacial, é necessário submeter o DUT a um campo não uniforme através de uma combinação de variação da propagação angular do sinal ou de sua polarização ou de uma combinação de ambos.

O trabalho para padronizar os métodos de medição MIMO OTA e os requisitos de desempenho evoluiu dos padrões SISO OTA desenvolvidos conforme descrevem Quian *et al* [11] e posteriormente na 3GPP [18].

Os dois principais desafios na avaliação de dispositivos MIMO são, definir as condições do canal (incluindo qualquer ruído ou interferência), nas quais o desempenho deve ser avaliado e, criar fisicamente esse ambiente e testar o dispositivo. O último passo representa o maior desafio para a indústria

de ensaios, pois a emulação das condições de propagação de canais feitas eletricamente utiliza um emulador de canais com uma conexão cabeada (galvânica) ao DUT. Esse é o método tradicional para medir o desempenho do receptor, mas claramente ignora as antenas do DUT e não tem relevância para o ensaio OTA. Assim, para o ensaio MIMO OTA, o desafio da emulação de canal mudou do domínio conduzido para o domínio irradiado, conforme cita Rumney *et al* [17].

Os trabalhos sobre métodos de ensaios MIMO irradiados constam no CTIA [19] e na 3GPP [20]. O ensaio de desempenho MIMO de um dispositivo requer a criação de campos radiados espaciais que devem imitar o tipo de ambiente de rádio que o dispositivo veja em operação real. Tanto a CTIA quanto a 3GPP optaram por usar o modelo Macro urbano de canal espacial estendido (SCME - *Spatial Channel Model Extension*) (UMa) e micro urbano (UMi), conforme definido na 3GPP [21] como base para o desenvolvimento de métodos e requisitos de ensaio.

Além dos dispositivos tradicionais novas tecnologias que utilizam ondas milimétricas requerem bandas que operam em frequências acima de 24 GHz já aprovadas no Release-15 da 3GPP [14], e também novas estruturas e procedimentos de acesso à formação de feixes (*beamforming*) que aumentam o design em complexidade, aumentando a dificuldade do projeto e os procedimentos de teste de protótipos funcionais. Em uma transmissão em faixas desse tipo o maior desafio é superar as perdas de trajetos e problemas de propagação em multipercursos.

Devido à grande quantidade de espectro disponível na banda de ondas milimétricas, essa tecnologia se tornou importante nos sistemas de comunicação celular 5G. Comparado com a comunicação abaixo de 6 GHz, o canal de ondas milimétricas apresenta maiores perdas de penetração e energia devido à dispersão, assim, o sinal está sujeito a maiores desvios de percurso e congestionamento de transmissão nessas bandas, além do comprimento de onda que nestas frequências de ondas milimétricas é mais curto o que resulta em um tamanho físico da antena menor que o tamanho da antena em sub-6

GHz. Portanto, o sistema de antena massiva de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO) pode ser configurado com mais antenas para aumentar a potência do sinal. É sabido que o MIMO massivo é uma das principais tecnologias na comunicação 5G, e a avaliação do desempenho das antenas é significativa para o design e desenvolvimento dos dispositivos que operem em ondas milimétricas. Dadas as demandas de avaliação do equipamento no futuro, o teste para sistemas de antenas controláveis será uma tarefa sem precedentes conforme descrevem Xin *et al* [22].

3.5. Produtos comerciais para testes de qualificação e certificação

Realizar adequadamente medições de desempenho de RF, como potência transmitida, qualidade do sinal de transmissão e emissões espúrias, considerando a influência dos multipercursos. Para tal, existem diversos métodos de teste OTA.

Segundo a Keysight [23], futuramente, o 5G terá ensaios de baixa frequência que serão semelhantes aos 4G, mas para frequências de ondas milimétricas, os ensaios exigirão novos métodos com a finalidade de caracterizar os seguintes parâmetros:

- Desempenho de RF - nível mínimo de qualidade do sinal;
- Demodulação - desempenho da taxa de transferência de dados;
- Gerenciamento de recursos de rádio (RRM - *Radio Resource Management*) - acesso inicial, transferência e mobilidade
- Sinalização - procedimentos de sinalização da camada superior.

Grupos de estudo 3GPP e ITU ainda estão trabalhando nas definições dos métodos de teste para demodulação do dispositivo e RRM.

Atualmente os métodos de ensaio 5G OTA, incluem câmaras, sondas e equipamentos de ensaio usados para atender a uma ampla variedade de requisitos de RF, demodulação e teste de desempenho funcional em ambas faixas de frequência ondas milimétricas e abaixo de 6 GHz.

Com o objetivo de medir o desempenho do dispositivo em condições de canal do mundo real, os designers devem ir além dos ensaios em um ambiente

de validação estável e controlado. Emuladores de canal são uma ferramenta fundamental que além de simular o ambiente real ainda fornece controle e repetibilidade para essas condições. Isso permite que os designers ensaiem uma variedade de novas tecnologias, incluindo larguras de banda de sinal mais amplas, frequências de ondas milimétricas e direção de feixe com problemas de propagação de sinal, como perda de percurso, desvanecimento devido aos multi percursos, e atraso na propagação. Como parte de uma plataforma de teste completa, essa solução permite uma ampla variedade de situações onde é possível identificar rapidamente quaisquer casos de uso que possam comprometer potencialmente a experiência do usuário durante o uso do dispositivo final.

Segundo o Microwave Journal [24], para a realização dos ensaios de 5G NR (*New Radio*), novas tecnologias são necessárias visando contemplar a faixa de frequências com ondas milimétricas. Diversas soluções já estão no mercado com essa finalidade, câmaras blindadas, compactas e móveis que incorporam todos os métodos de teste OTA permitidos para 3GPP (IFF, NFTF e DFF), disponíveis para os mais variados tamanhos de dispositivos e com um enorme range de frequência, dentre as quais destacam-se os modelos:

- ATS-1000 da R&S
- AMS-5700 da ETS-Lindgren
- Soluções CATR baseadas nos métodos IFF da Keysight
- SG3000F da MVG
- SNF-FIX-1.0 da NSI-MI
- Pro MS2090A da Anritsu
- Série PT da Emite

O anexo A contém a descrição e cronograma de disponibilidade das principais soluções disponíveis que foram listadas acima.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Proposta de Método para execução da PdC

Para avançar com o projeto definiu-se que a implementação física seria baseada nos métodos e materiais utilizados na Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, escrita por Erick Farias da Silva em 2008.

Com base nos objetivos específicos traçados buscou-se então a elaboração de uma prova de conceito de câmara de reverberação. Com a motivação de explorar o seu funcionamento prático e gerar um apontamento técnico-científico para um projeto de pesquisa e desenvolvimento de uma câmara com aplicação para ensaios de qualificação e certificação de dispositivos. Sendo assim, considerou-se a construção de uma CR com a estrutura mínima necessária para realizar ensaios e medição. A divisão do projeto desta CR definiu-se da seguinte forma:

4.2. Implementação de uma PdC de CR

4.2.1. Mínima Frequência Utilizável (MFU) e Fator de Qualidade (Q)

O primeiro ponto a se observar é a definição da mínima frequência utilizável (MFU), sendo esta, uma condicionante das dimensões da CR. Portanto, neste projeto a frequência mínima utilizável esperada é de 800 MHz, que inicialmente foi definida de forma empírica. E os cálculos que a validam estão descritos no item 4.2.2.

O segundo ponto é o fator de Qualidade, isto é, descreve a capacidade que a CR tem de armazenar energia. Capacidade que está relacionada com as perdas de energia no interior da CR. Logo, se Q tiver um valor alto, isto é, um indicativo de que a CR tem uma alta eficiência em armazenar energia, que é o desejado no projeto, conforme descrevem Quian *et al* [11], a energia decai

de forma não exponencial no interior da CR, dada por uma constante de decaimento (τ_{CR}) que tem relação com fator Q, se um parâmetro for conhecido é possível obter o outro pela relação $Q = \omega\tau_{CR}$. Além disso, é preciso levar em consideração que as perdas nas paredes da CR, a presença de antenas e do DUT são itens que contribuem para a diminuição do Q.

Conforme mencionado por Silva [25], considerou-se a CR vazia, e então foi possível encontrar um valor aproximado para Q, conforme equação (1).

$$Q = \frac{3V}{2S\delta} \quad (1)$$

Na equação (1), V representa o volume da CR, S representa o somatório das superfícies das paredes da CR e o δ representa a profundidade de penetração pelicular no material constituinte das paredes, cujo valor pode ser calculado pela equação (2):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (2)$$

Na equação (2), σ é a condutividade do material e μ a permeabilidade magnética do mesmo. segundo descrevem Quian *et al* [11], na prática o valor de Q da CR pode ser obtido no domínio da frequência através da equação de Hill (3) ou no domínio do tempo a partir da constante de decaimento. No domínio da frequência, a partir da equação de Hill, temos a relação entre a potência recebida (PR) e potência transmitida (PT) apresentada na equação (3).

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3} \frac{PR}{PT} \quad (3)$$

Segundo Quian *et al* [11], a perda de inserção afeta diretamente o fator Q, esta qual representa a perda de inserção dos cabos e antenas utilizados na CR. O fator Q medido no domínio da frequência precisa ser corrigido por essas perdas de inserção.

4.2.2. Dimensionamento Físico da CR

Segundo Silva [25], para se iniciar o dimensionamento de uma CR um dos fatores mais importantes é a Zona de Campo Uniforme (ZCU) e para se obter esta deve-se considerar o fator de qualidade (Q).

De acordo com a IEC¹² [26], deve ser considerada a distância mínima de $\lambda/3$, de qualquer parede metálica ou agitador de modos para o valor de obtenção da ZCU. Foi observado em Silva [25] que o projeto da CR possuía ZCU com forma geométrica equivalente a um paralelepípedo, com dimensões de 55x60x65 cm³ (altura x largura x comprimento). Além disso, segundo Silva [25], o volume da ZCU inicialmente foi definido de forma empírica e consideradas dimensões aproximadas de um dispositivo com o formato de um gabinete de computador.

Outro ponto importante é que a forma do agitador de modos influencia na uniformidade do campo, sendo assim neste projeto será utilizado apenas um agitador que tem seus detalhes tanto de projeto quanto construtivo descritos no item 4.2.3. Considerou-se que a espessura do mesmo é desprezível e que ele está colocado a 5 cm da parede metálica localizada no eixo do comprimento da CR, as dimensões da ZCU sofrem alteração para 55x60x60 cm³, observe que a única medida alterada é a do comprimento, justamente onde está posicionado o agitador.

Depois de decidir as dimensões da ZCU e tendo em conta que sua fronteira limite deve respeitar o limite de $\lambda/3$ das paredes metálicas e do agitador de modos pode-se calcular as dimensões mínimas necessárias à CR para suportar a ZCU escolhida, conforme a equação (4):

¹² IEC - *International Electrotechnical Commission*. A Comissão Eletrotécnica Internacional é uma organização internacional de padronização de tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas. Alguns dos seus padrões são desenvolvidos juntamente com a Organização Internacional para Padronização. A sede da IEC, fundada em 1906, é localizada em Genebra, Suíça. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Comiss%C3%A3o_Eletrot%C3%A9cnica_Internacional>. Acesso em: 07 nov. 2020.

$$\text{Altura} = a = 2\frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{altura}} = 80\text{cm}$$

$$\text{Largura} = b = 2\frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{largura}} = 85\text{cm} \quad (4)$$

$$\text{Comprimento} = d = 2\frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{comprimento}} + \text{Dagitador} = 90\text{cm}$$

Depois de definir as dimensões físicas da CR, deve-se verificar se a menor frequência de ressonância da CRR (Cavidade Ressonante Retangular) é menor ou igual a 800 MHz. As frequências de Ressonância da cavidade podem ser encontradas através da equação (5), que é derivada das equações de Maxwell aplicadas à geometria de uma CRR. Onde “a” é a altura, “b” é o comprimento, “d” é a largura da cavidade, “m” é o modo de ressonância no eixo x, “n” é o modo em y, “p” é o modo em z e c é a velocidade da luz no vácuo.

$$f_{\text{ressonância}} = 3\frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (5)$$

Neste caso, considerou-se o modo TE₀₁₁ conforme descrito em Silva [25] que parametriza os valores de m, n e p, respectivamente, verificou-se que a menor frequência de ressonância é o resultado da equação (6):

$$f_{\text{ressonância}} = 3\frac{3 \cdot 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{0,80}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,90}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,85}\right)^2} = 728,2\text{MHz} \quad (6)$$

Ou seja, o valor encontrado é melhor do que a MFU definida neste projeto, no entanto, caso a ressonância esteja acima da MFU, as dimensões da CR devem ser revistas. Neste caso, não foi necessário.

¹³ Esta equação vem dos conceitos de microondas, quando se usa um guia de onda e fecha as duas extremidades. disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_cavity> Acesso em: 27 out. 2020.

Outro fator importante é o número de modos suportados pela CR, tratando-se da construção de uma CR. Segundo a IEC [26], para que funcione de acordo, uma CR deve suportar no mínimo 60 modos ressonantes na MFU, sendo que o número de modos ressonantes pode ser calculado pela equação (7):

$$N_s(f) = \frac{8\pi}{3} abd \left(\frac{f}{c_0} \right) - (a + b + d) \frac{f}{c_0} + \frac{1}{2} \quad (7)$$

Verificou-se que conforme o resultado da equação (8), a CR atende ao número mínimo de modos.

$$N_s = \frac{8\pi}{3} 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \left(\frac{800 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} \right) - (0,8 + 0,9 + 0,85) \frac{800 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} + \frac{1}{2} = 91 \quad (8)$$

Caso os valores do número de modos e a MFU não sejam coerentes, as dimensões da câmara devem ser novamente calculadas.

O desenho das paredes da CR pode ser visto no Apêndice B.

4.2.3. Agitador de Modos

O agitador de modos tem a finalidade de alterar continuamente as condições de contorno no interior de uma CR e assim evitar a formação de ondas estacionárias que podem comprometer a uniformidade de campo.

Segundo Silva [25], optou-se por utilizar apenas um agitador posicionado no interior da CR, com o objetivo de verificar se apenas um agitador é suficiente para elevar o nível de uniformidade de campo dentro dos padrões previsto na norma IEC 61000-4-21. Neste projeto, foram utilizados agitadores de modos no *formato de cruz*¹⁴.

¹⁴ Segundo Silva [25] o formato do agitador de modos foi definido através de P. Corona, G. Ferrara, M. Migliaccio, "Reverberating Chambers as Sources of Stochastic Electromagnetic Fields", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, N 03, 1996.

De acordo com Silva [25], o tamanho do agitador foi projetado para ter dimensões (de comprimento) entre 50% e 75%¹⁵ das dimensões da parede da CR à qual está fixado. Desta forma, o agitador afetará a distribuição do campo de tal maneira que a uniformidade seja elevada.

Um agitador deve ter dimensões de pelo menos um quarto do comprimento de onda. Um dos objetivos deste trabalho foi de construir uma CR compacta, dadas as dimensões da cavidade, a confecção de um agitador de modos maior ou igual a 2λ seria impraticável, dado o comprimento de onda para a MFU de 800 MHz que é de $\lambda=37,5$ cm. Definiu-se que o agitador teria dimensões de aproximadamente 60×63 cm², de tal forma que o mesmo possuísse dimensões entre 50% e 75% do tamanho de 80×85 cm² da parede de fixação do mesmo conforme descrito em Silva [25].

O desenho do projeto do agitador pode ser visto no Apêndice B.

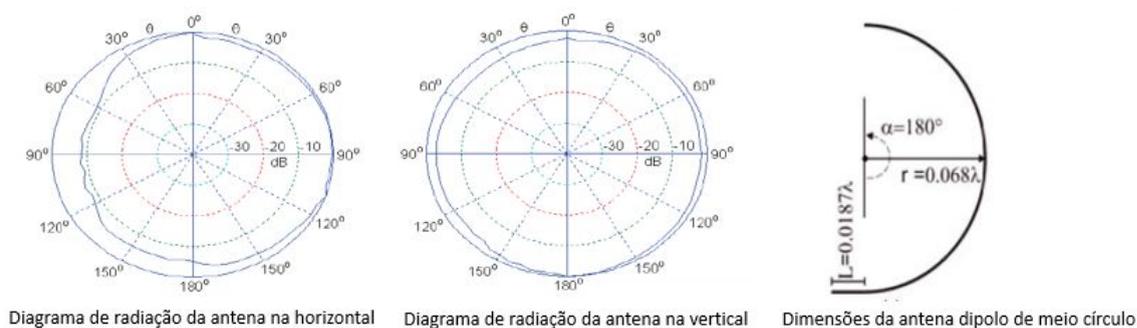
4.2.4. Antenas

Devido à simplicidade de construção, foi utilizado no trabalho de Silva [25], uma antena do tipo dipolo de meio comprimento de onda. Para recepção, é importante que a antena funcione como um sensor de campo isotrópico, e para conseguir isso utilizou-se uma antena dipolo curvado desenvolvida pelo autor em parceria com o laboratório da universidade. As antenas foram projetadas de tal modo que ambas possuíssem a mesma frequência de ressonância de 800 MHz e por opção de Silva [25] a operação das antenas nesta única frequência.

Para que a antena dipolo curvado ressoe na frequência de 800 MHz, esta deve possuir um raio $r=2,55$ cm e uma base $L=0,7$ cm, conforme ilustra a Figura 06. Um sistema denominado por Silva de BALUN (*Balanced to Unbalanced*), transformador de $\lambda/4$, foi utilizado para adaptação e casamento da linha desbalanceada para linha balanceada.

¹⁵ Segundo Silva [25] as dimensões (de comprimento) do agitador foram definidas através de S.-P. Yu, A. F. Bunting, "Statistical Investigation of Frequency-Stirred Reverberation Chambers", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol.1, pp. 155-159, Istanbul, 2003.

Figura 06 - Dimensões e diagrama de radiação da antenna dipolo.



Fonte: [25].

4.2.5. Orçamento e Materiais da CR

Em relação aos materiais utilizados na construção da CR também é importante considerar que parte das perdas que contribuem para a diminuição do fator de qualidade e estão relacionados com o tipo de material utilizado na sua construção. No projeto optou-se por utilizar alumínio devido à disponibilidade desse material e a sua maleabilidade. Há ainda o fato de que o alumínio é uma liga metálica de baixas perdas, tendo $\sigma = 37,7 \times 10^6 \text{ S/m}$ e $\mu = 1,26 \mu\text{N/A}^2$. O fator de qualidade teórico da CR apresentado foi: $Q \approx 31024$ conforme definido por Silva [25].

A lista mínima de materiais a ser utilizada para a construção da CR é a detalhada abaixo:

Tabela 3: Lista de materiais para construção da CR

Material para Construção da CR	Quantidade
Chapa de Alumínio Número 18 (2x1 m)	3
Chapa de Alumínio Número 16 (2x1 m)	1
Parafusos (Diâmetro 4,5 mm)	100
Roscas	200
Porcas	100

Motor de Indução AC de 55W	1
Dimmer	1
Conector tipo N macho para cabo RG 213	6
Conector Fêmeos do tipo N com base quadrada para cabo RG 213	2
Cabo RG 213	4 m

Fonte: Do próprio autor.

4.3. Adequação do método proposto

4.3.1. Ajuste dos pontos de medições na ZCU

Em Silva [25], foram adotados 8 pontos de medição nos vértices da ZCU em formato retangular.

Os pontos de medições na ZCU da CR foram alterados para melhor adequação à medição de sinais de RF e atendimento à norma IEC 61000-4-21, portanto, durante o desenvolvimento optou-se por um método de medição de sinais, cujo os pontos de medições adotados, se unidos e considerados dois planos, estes indicam um volume útil com formato cilíndrico. Então, os planos foram posicionados na borda de cada uma das bases que compõem um cilindro dentro da ZCU conforme descrito no item 5.2.3.

4.3.2. Alteração de tipo de antena utilizada

Além das alterações mencionadas acima, para realização das medidas e caracterização da câmara decidiu-se pela escolha de Antenas tipo Arranjo Log-Periódico de Dipolos (LPDA - *Log-Periodic Dipole Array*) impressas, modelo WA5VJB, que consistem em dipolos de meia onda em série, alimentados com fases adequadas, espaçados em intervalos seguindo uma função logarítmica da frequência, suas propriedades elétricas variam de acordo com essa função.

Segundo Sun *et al* [27], o padrão de radiação da LPDA é unidirecional, com o lóbulo principal ao longo do eixo horizontal, partindo da extremidade com os elementos mais curtos. Os elementos que compõem essa antena possuem ressonância em um comprimento de onda particular, que é correspondente a duas vezes o comprimento do elemento. E a largura de faixa da antena, que corresponde a faixa em que o ganho máximo é alcançado, está contida entre as frequências ressonantes do elemento mais curto e do mais longo, esses elementos estão conectados eletricamente a linha de alimentação da LPDA, uma linha horizontal que se estende ao longo do centro da antena, os elementos são conectados sucessivamente em fases opostas na linha de alimentação, conforme ilustra a Figura 07. Essa alimentação alternada é necessária para que a radiação ocorra na direção dos pares de dipolo menores e as correntes que percorrem os monopólos estão em direções opostas, de forma que estas não afetem o padrão de radiação. A forma impressa em uma placa contribui para redução de tamanho desses modelos com baixa perda de retorno.

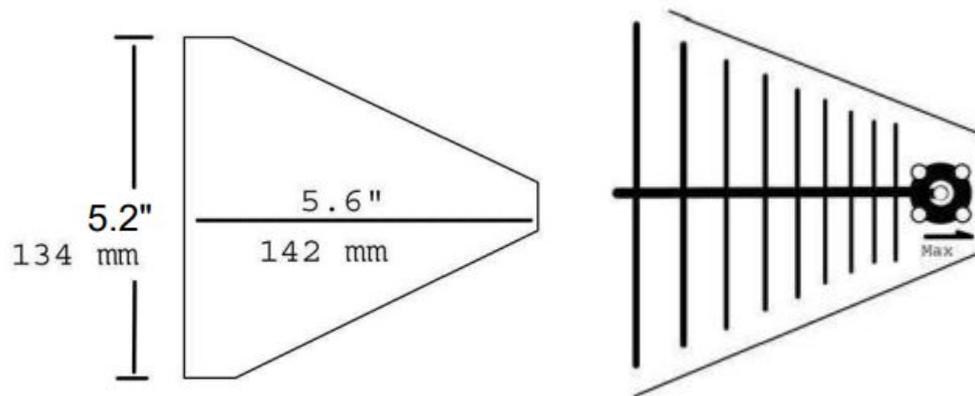
Esse modelo de antena foi escolhido devido a sua resposta em uma faixa larga de frequência e transmissão direcional, dessa forma o sinal de transmissão foi irradiado em um dos cantos da CR e a medição foi realizada em pontos dentro da ZCU.

As LPDAs foram usadas como antenas de transmissão e recepção posicionadas em um suporte de cano de pvc.

Essas antenas operam na faixa de 850 MHz a 6,5 GHz e foram adquiridas em um fornecedor situado na América do Norte¹⁶. O modelo da antena LPDA adquirida possui as dimensões mostradas na Figura 07 e ganho mínimo declarado de 6 dBi, com variação ao longo da faixa de resposta em frequência.

¹⁶ Empresa Kent Eletronics - TEXAS / EUA - site: <https://www.wa5vjb.com/about.html>

Figura 07 - Antena Dipolo Log Periódica



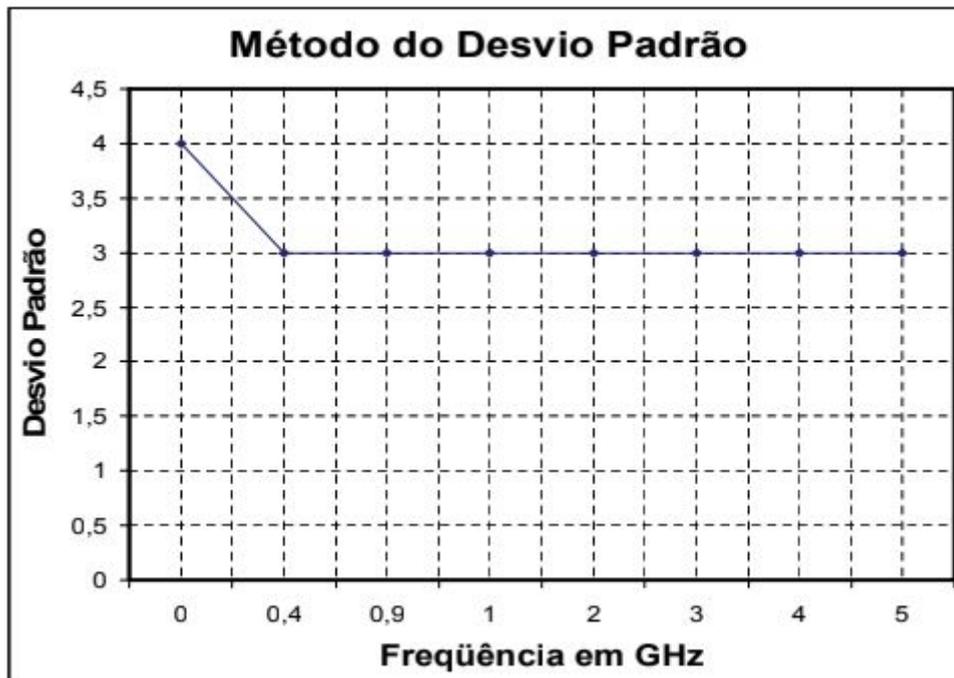
Fonte: [27].

4.3.3. Adequação de cálculo do desvio padrão

O objetivo deste trabalho é analisar a uniformidade de campo dentro do volume útil no interior da CR construída, para tal é necessário encontrar condições em que o desvio padrão atenda aos requisitos nas frequências determinadas para uso da câmara. Adotou-se a norma IEC 61000-4-21 que trata sobre câmaras de reverberação para aplicação em ambientes de ensaios OTA, já que no Brasil não há uma documentação específica para estes dispositivos.

Essa norma estabelece os limites de valor do desvio padrão do campo para os quais pode-se considerar que este é uniforme. Desta forma, com base na ZCU definida empiricamente no item 4.2.2 buscou-se utilizar um plano de medições descrito em 4.3.1 para verificar as designações de desvio padrão advindos da norma IEC 61400-4-21, conforme apresentados na Figura 08.

Figura 08 - Desvio padrão segundo a IEC



Fonte: [25].

Com base no texto da norma, determinou-se a equação (9) para o cálculo do desvio padrão, conforme:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (x - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Onde x representa o valor médio dos valores máximos de potência das N posições de medições ($N = 14$). Após o cálculo do valor do desvio padrão dos valores máximos de potência, deve-se então calcular o desvio padrão global em dB, obtido pela equação (10). A CR atenderá aos requisitos da norma IEC 61000-4-21 e poderá ser considerada conforme se para as frequências determinadas o valor do desvio padrão global for inferior a 3 dB.

$$\sigma_{(dB)} = 10 \log \left(\frac{(\bar{x} + \sigma)}{\bar{x}} \right) \quad (10)$$

5. DESENVOLVIMENTO E TESTES

5.1. Caracterização das Antenas

A caracterização das antenas foi realizada com o VNA (*Vector Network Analyzer*) fabricado pela Anritsu, no método realiza-se a calibração do instrumento, na faixa de frequências de interesse (800 MHz a 6 GHz) e considera-se o trecho de cabo de interligação com a antena sob ensaio. E então posicionou-se as antenas de modo a medir a resposta da antena, quanto à sua característica de perda por retorno, em seu range total de operação. A imagem 01 mostra o setup utilizado para essa caracterização.

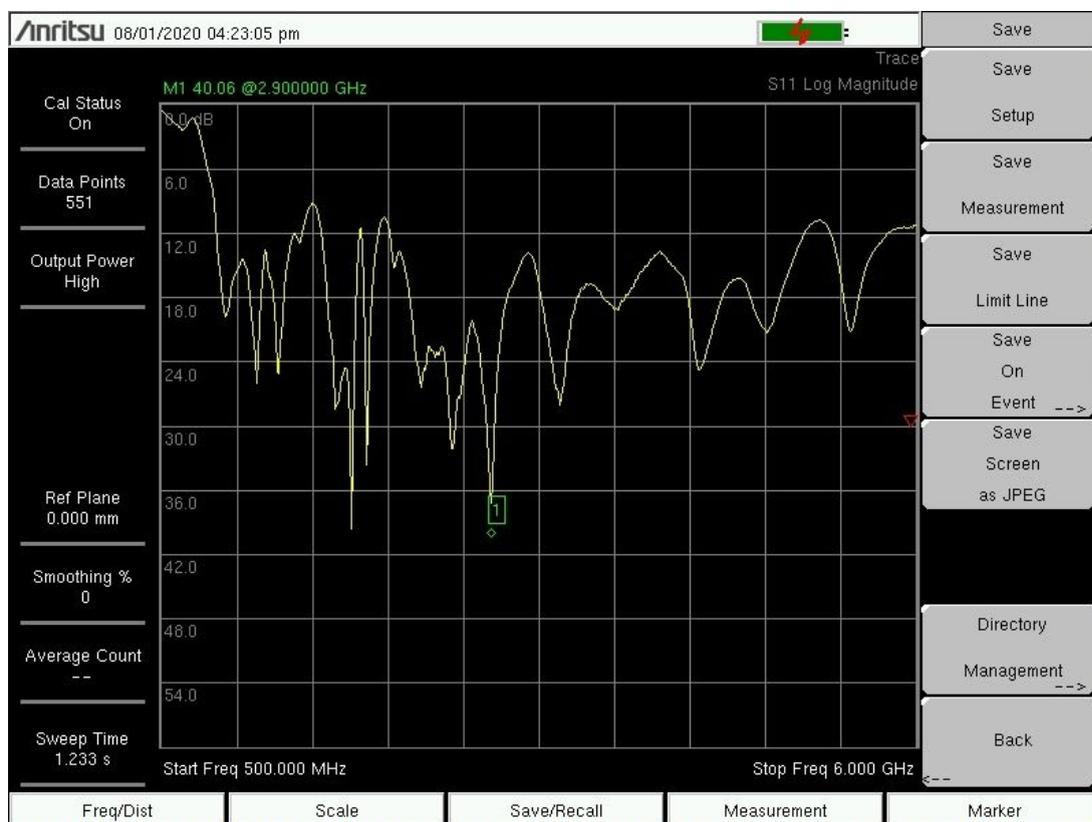
Imagem 01 - Setup de caracterização da antena.



Fonte: Do próprio autor

Após a caracterização obteve-se a curva de Perda por Retorno x Faixa de Frequência da antena LPDA, conforme mostra a Figura 09. É possível notar que as antenas apresentam Perda por Retorno melhor que -10 dB, para frequências entre 700 MHz e 6 GHz, sendo, portanto, adequadas às medições na faixa sub-6GHz a partir de 800 MHz.

Figura 09 - Perda por Retorno x Faixa de Frequência



Fonte: Do próprio autor.

5.2. Caracterização da CR

5.2.1. Montagem da CR

Uma primeira motivação na escolha da CR desenvolvida por Silva [25], foi devido ao fato da facilidade de montagem da mesma, e ao fato de atender a faixa de frequência visando o ambiente de testes para dispositivos da Quinta Geração de dispositivos móveis, nas faixas de frequência abaixo de 6 GHz (sub-6).

Para a montagem da CR foi adicionada, nas junções da mesma, conforme imagem 02(b), espuma de fio de cobre para absorver e evitar possíveis fugas de campo eletromagnético, preenchendo quaisquer espaços vazios que por ventura houvesse nas arestas da CR.

Optou-se, como forma de facilitar o acesso ao interior da CR, por utilizar uma das paredes da mesma, de acordo com a imagem 02(a). De tal maneira que a parte superior, no qual foi fixada a estrutura das antenas, ficasse disponível para abertura e fechamento, bem como, para ajustes na altura da antena receptora, conforme ilustra imagem 02(c). Para a antena transmissora, optou-se por fixá-la na mesma estrutura da parede móvel, apontada para um dos vértices da CR, de modo que não haja radiação direta entre as antenas em nenhum dos pontos da ZCU.

Imagem 02 - Montagem da câmara de reverberação



Fonte: Do próprio autor

5.2.2. Operação e testes iniciais da CR

A caracterização da Câmara, realizada conforme o método proposto pela IEC 61000-4-21 (anexo B), que determina a execução da técnica de validação de Uniformidade de Campo.

Para utilização do VNA, equipamento que permite realizar a caracterização de um caminho de medição, considera-se os cabos e conectores, e assim isola-se esses fatores do valor que será medido. Desta forma, realizou-se a calibração seguindo os passos do manual de usuário disponível no site do fabricante¹⁷.

¹⁷ VNA Master - MS2036A. Anritsu envision: ensure, 2020. Disponível em: <<https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/ms2036a>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

5.2.3. ZCU de trabalho e Planos de Medição

Para avaliar o desempenho de uniformidade de campo da CR a IEC 61000-4-21 define que deve-se medir no mínimo oito pontos nos vértices que definem a ZCU e cada um desses pontos deve estar a uma distância mínima de $\lambda_{MFU}/3$ (onde λ_{MFU} é o comprimento de onda da menor frequência utilizada em qualquer parede metálica).

Neste trabalho, a ZCU definida empiricamente e descrita no item 4.2.2 determina o volume útil de trabalho da CR construída. Como as dimensões (altura x largura x comprimento) da ZCU são menores do que todas as dimensões da CR, logo, o volume da ZCU não é utilizável para frequências inferiores a 800 MHz. Essa redução no tamanho contribui para o aumento da uniformidade de campo devido a redução da probabilidade na formação de ondas estacionárias no interior da câmara.

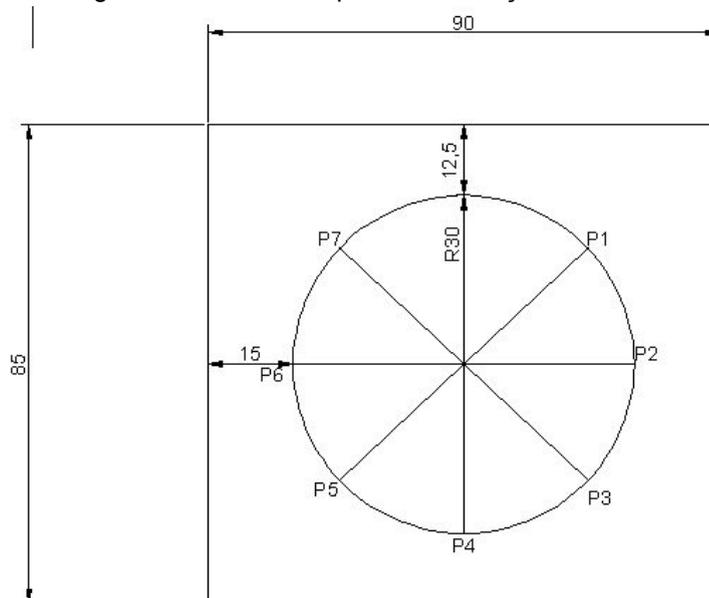
Para a MFU (800 MHz), têm-se que o comprimento de onda é de 37,5 cm. E conforme a ZCU definida a distância mínima de qualquer parede metálica é de $\lambda_{MFU}/3 = 12\text{cm}$ aproximadamente. Neste trabalho a distância dos vértices da ZCU definida estão conforme o previsto na norma em questão, haja vista que, os mesmos se encontram a 15cm e 12,5cm das medidas de comprimento e largura, respectivamente, da câmara.

A norma sugere a medida de 8 pontos, sendo assim, os valores máximos de potência foram medidos em 14 pontos distribuídos em 7 pontos em um plano superior e 7 pontos em um plano inferior.

Os planos foram posicionados de forma a estarem distantes entre si, sendo considerada uma distância de 55cm, a qual, refere-se a dimensão da altura da ZCU definida. Desta forma, verificou-se que a distribuição dos pontos de medições em cada um dos planos remetiam a uma circunferência, que por sua vez, são as bases de uma figura geométrica cilíndrica. Com isto, o cilindro (ZCU de trabalho) é o volume útil utilizado para as medições e verificação da uniformidade. E ao aumentar o número de pontos de medições, buscou-se dados mais abrangentes que facilitassem a descrição do comportamento do

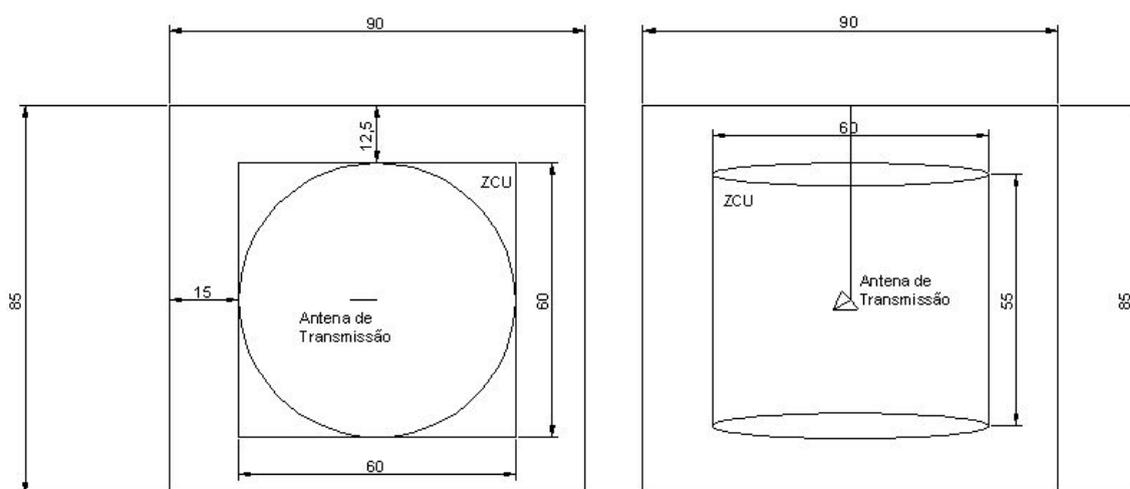
campo no interior da ZCU e reduzisse a probabilidade de que alguma onda estacionária não fosse percebida. A representação do plano de medições definido pode ser visto nas nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Pontos do plano de medição da CR



Fonte: Do próprio autor.

Figura 12 - Vistas do cilindro de medidas interno à ZCU e antena de transmissão



FONTE: Do próprio autor.

Portanto, ao se analisar os planos de medições dispostos nas bases do cilindro no interior da ZCU, conclui-se que o volume útil de trabalho, sendo os valores medidos de $r = 30$ cm e $h = 55$ cm , é dado por (11):

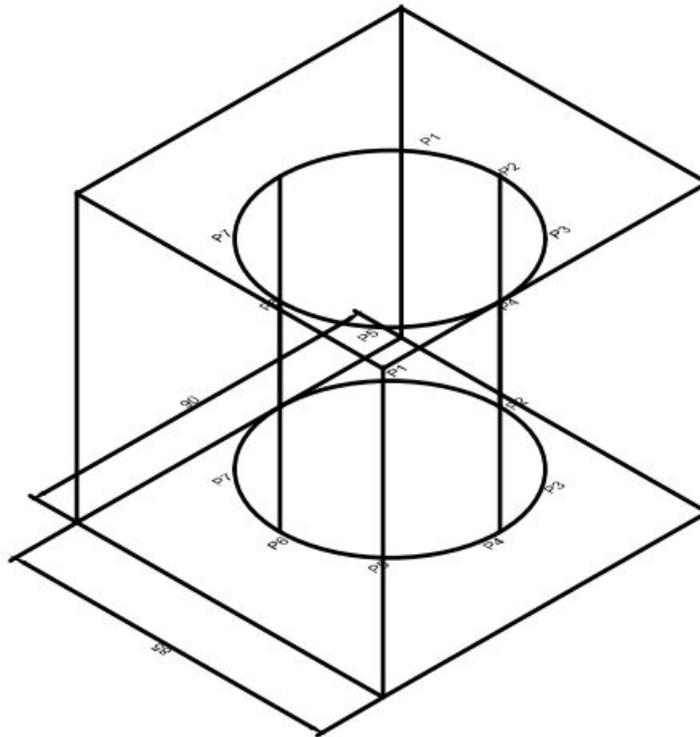
$$\pi * r^2 * h = 155,5cm^3 \quad (11)$$

A CR possui um volume total de $85cm \times 90cm \times 80cm = 612$ cm³ e a ZCU de forma retangular $55cm \times 60cm \times 60cm = 198$ cm³, ou seja, representa um total de 32,35% do volume total, onde podem ser colocados equipamentos e dispositivos sob teste.

As medidas foram realizadas em dois planos distantes pela altura da ZCU, a fim de cobrir a ZCU nas extremidades conforme descrito acima. A norma IEC 61400-4-21 estabelece que o valor máximo de potência seja medido em um ciclo de rotação do agitador para cada um dos pontos a serem medidos. Após a aferição dos valores máximos em cada um dos pontos, segundo o item 4.3.3, calculou-se o desvio padrão das amostras e posteriormente o desvio padrão global apresentados no item 6.

As medidas foram realizadas em duas condições distintas, sendo uma delas com o agitador de modos desligado e outra com o agitador girando em velocidade estável. Essa medida foi realizada pelo menos um minuto após o agitador ser ligado, para que a inércia do elemento fosse totalmente eliminada e tivesse a velocidade constante. Esses dois cenários foram adotados para que pudesse ser analisada e compreendida a influência do agitador de modos na distribuição espacial do campo no interior da CR, em ambos os casos, seguiu-se a medição nos mesmo pontos e planos, conforme as extremidades do cilindro que podem ser vistas na Figura 13.

Figura 13 - Pontos de medição no cilindro de medidas interno à ZCU



Fonte: Do próprio autor.

As medições realizadas nos sete pontos em cada um dos planos foram realizadas sem a necessidade de abertura da tampa da CR através de mecanismo que permite rotacionar o posicionamento da antena de recepção. Entretanto, na transição de um ponto para outro e, posteriormente, na transição de um plano para outro, foi necessário abrir a CR para posicionar o mecanismo com a antena de recepção. A acomodação das superfícies de contato da tampa tendem a não realizar a vedação eletromagnética da mesma forma, cada vez que é manipulada, produzindo determinada incerteza nas medições. Dessa forma, antes da realização das medições planejadas, foram realizadas cinco medições após cada procedimento de abertura e fechamento da CR, na frequência de 2,4 GHz. Os dados foram tratados, seguindo os passos de cálculo de incerteza descritos em Gallas [29], e obteve-se um valor de incerteza positivo e um negativo baseados em um cálculo que envolve a média e o desvio padrão dos pontos medidos, conforme tabela 4.

Tabela 4 - Incerteza associada a medida no processo de abertura e fechamento da tampa

1,57 dB	-2,48 dB
---------	----------

Para simplificar o procedimento e eliminar a necessidade de considerar essa incerteza, optou-se por avaliar a uniformidade de campo separadamente em cada plano. A cada mudança de plano realizou-se uma nova calibração do VNA.

6. RESULTADOS

Para aplicação da CR em testes OTA que atendam aos requisitos das principais tecnologias presentes no mercado escolheu-se as frequências de 850 MHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz e 5 GHz para realização da caracterização e avaliação de desempenho da CR.

Tais faixas representam os principais serviços disponíveis no mercado em se tratando de telecomunicações. 850MHz é uma faixa amplamente utilizada nos serviços de comunicações móveis, já a faixa de 2,4 GHz corresponde ao *ISM band*¹⁸ e esta ao longo dos anos tem sido utilizada para o uso de sistemas de comunicação sem fio, como, o *Bluetooth*¹⁹ e o *WiFi*²⁰, a faixa de 3,5 GHz desponta como a primeira banda onde serão ofertados os serviços e conexões 5G e a faixa de 5 GHz, além de possuir uma parte do espectro destinada a serviços de banda larga sem fio também tem sido utilizada na oferta dos serviços de comunicação C-V2X que compõem as tecnologias relacionadas a comunicação veicular.

¹⁸ As bandas de rádio ISM são partes do espectro de rádio reservadas internacionalmente para fins industriais, científicos e médicos (ISM), exceto telecomunicações. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/ISM_band>. Acesso em: 28 out. 2020.

¹⁹ Bluetooth é uma especificação de rede sem fio de âmbito pessoal (*Wireless personal area networks* – PANs) consideradas do tipo PAN ou mesmo WPAN. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>>. Acesso em: 28 out. 2020.

²⁰ *Wi-Fi* é uma marca registrada da *Wi-Fi Alliance*. É utilizada por produtos certificados que pertencem à classe de dispositivos de rede local sem fios (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.11. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>>. Acesso em: 28 out. 2020.

Inicialmente definiu-se dois cenários para medição, um na extremidade inferior e outro na extremidade superior, ambos em duas condições, agitador ligado e desligado para cada um dos pontos descritos no item 5.2.3.

De acordo com o requisito, um valor de desvio padrão de no máximo 3dB garante a uniformidade de campo necessária para que a CR seja considerada conforme. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 5 - Resultados de verificação da conformidade com a norma IEC 61000-4-21.

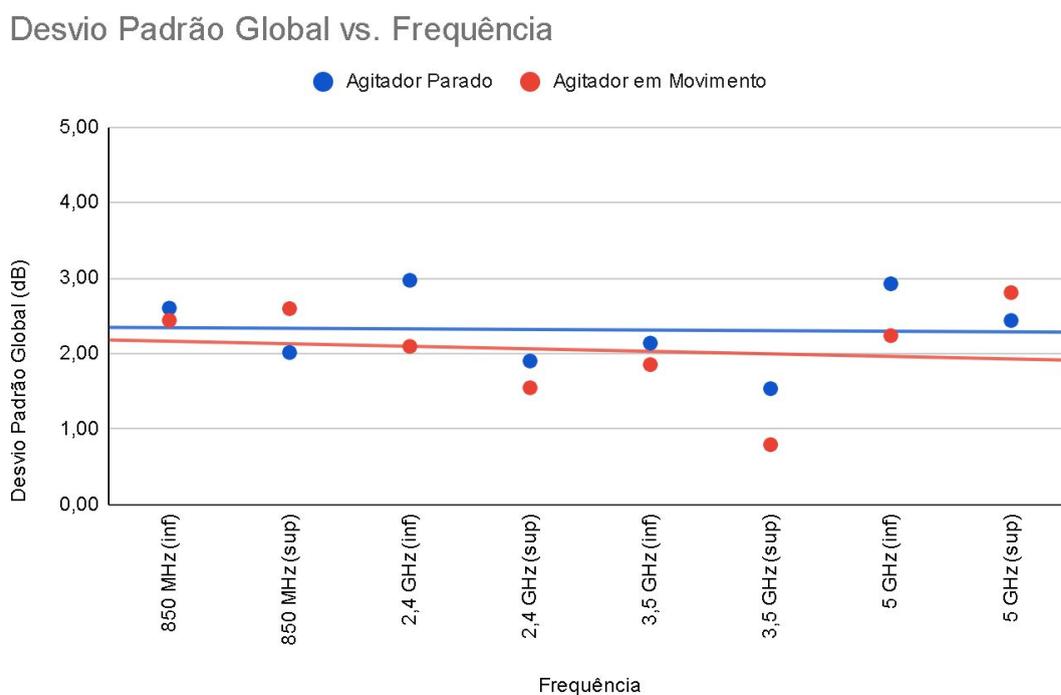
Frequência	Condição de Movimento	Plano de Medidas	Valor
850 MHz	Agitador Parado	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,60 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	2,01 dB
	Agitador em Movimento	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,44 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	2,59 dB
2,4 GHz	Agitador Parado	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,97 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	1,90 dB
	Agitador em Movimento	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,09 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	1,55 dB
3,5 GHz	Agitador Parado	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,14 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	1,53 dB
	Agitador em Movimento	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	1,85 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	0,79 dB
5 GHz	Agitador Parado	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,92 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	2,44 dB
	Agitador em Movimento	Desvio Padrão Global (Plano Inferior)	2,24 dB
		Desvio Padrão Global (Plano Superior)	2,81 dB

Fonte: do próprio autor.

A tabela 5 atesta que todos os resultados obtidos e devidamente convertidos estão em conformidade com a norma.

Ao analisar os valores obtidos nas medidas com a agitador parado e em movimento traçou-se o gráfico da Figura 14, verificou-se que o ponto de melhor uniformidade ocorreu na frequência de 3,5 GHz no plano superior, com o agitador em movimento, o desvio padrão global nessa condição foi 0,7 dBs menor do que com o agitador parado.

Figura 14 - Gráfico Desvio Padrão x Frequência dos valores medidos com linha de tendência



Fonte: Do próprio autor

No gráfico, de acordo com a linha de tendência é possível identificar que a faixa central onde estão as frequências de 2,4 GHz e 3,5 GHz apresentam valores com tendências mais claras, em que pode-se notar que o plano superior tem menor variação do que o plano inferior, isso se deve ao posicionamento das antenas no plano. Pois a antena de transmissão ocupa espaço no plano inferior, interferindo na uniformidade de campo desse plano. Essa configuração prejudica as medidas no plano inferior, pois as antenas

adquiridas realizam uma medida direcional, verificando apenas o sinal incidente em uma direção.

Além dos pontos citados, também deve ser apontado que as faixas de frequência mais próximas dos limites da antena apresentaram resultados piores, inclusive no plano de medição superior com os agitadores ligados influenciaram de forma negativa, aumentando o desvio padrão. Isso se deve às características da antena apontadas no item 5.1.

A caracterização desta demonstrou que a variação da uniformidade do campo no interior da CR sofreu variação devido a frequência, foi possível determinar que dentro da faixa de frequências medidas a melhor condição de desvio padrão ocorreu em 3,5GHz com o agitador em movimento no plano superior, porém esse comportamento não se repetiu na frequência de 5GHz, em que os valores aumentaram aproximadamente 2 dB na mesma condição no plano superior. Entretanto, a análise comprova que para as faixas de frequência analisadas a câmara atende ao requisito normativo em todas as condições em ambos os planos, mas isso não garante que a câmara seguirá o mesmo comportamento em frequências mais elevadas, por exemplo faixas de ondas milimétricas.

As medidas realizadas em uma CR são consideradas em essência medições estocásticas e portanto ao analisar os resultados é importante considerar a incerteza que está associada às medidas. Sabe-se que em processos de medidas com tais características quanto maior o número de amostras independentes, menor será a incerteza de medição. Porém, por mais conveniente que seja, o número de amostras independentes oferece uma visão limitada sobre os mecanismos de incerteza de medição. Ao separar os componentes agitados e não agitados do campo em uma CR, por exemplo, verificou-se que ocorre variação entre as medidas e portanto deve-se encontrar formas de mitigar tais diferenças, como por exemplo minimizar o fator K, descrito no item 3.1.

A prova de conceito desenvolvida foi feita de forma que permitisse acessar o interior para melhorar o posicionamento das antenas ou reparos

devido a alguma condição de medição que não atenda ao requisito. Um ponto importante foi a escolha por inserir material de lã metálica revestido de latão nos encaixes da CR, de forma que as ondas eletromagnéticas fiquem totalmente confinadas dentro da câmara não encontrando pontos de fuga que comprometam as medidas.

Durante o trabalho propôs-se uma adaptação no método de medida para facilitar a manipulação da antena, sem a necessidade de abrir e fechar a CR. Esse método proposto permitiu aumentar de 8 para 14 pontos de medição. Sugere-se um aumento nesse número de pontos de medição de tal forma que sejam tomadas amostras no interior da ZCU bem como em suas faces como ilustrado na Figura 11 e 12.

O método de validação e caracterização da CR foi adequado para medidas realizadas com VNA, a IEC 61000-4-21 sugere que as medidas sejam realizadas em unidades de campo elétrico em Volts/metro com foco em ensaios de Compatibilidade Eletromagnética, porém para aplicação em ensaios direcionados aos métodos OTA para dispositivos móveis, por exemplo, potência ou emissões fora da faixa, ao invés de utilizarmos medição de intensidade de Campo Elétrico, a intensidade do Campo Eletromagnético foi verificado pela potência entregue ao terminal da antena de recepção expressa em watt, assim realizou-se a adequação do cálculo de desvio padrão conforme item 4.3.3.

7. APLICAÇÃO AO V2x - comunicação (*Vehicle to Vehicle*)

7.1. Da comunicação através de serviço automotivo V2V

Seguindo as tendências evolutivas das comunicações móveis o serviço de direção autônoma tem ganhado espaço no mercado com a realidade cada vez mais próxima dos automóveis autônomos. Esse tipo de serviço possibilita a difusão de uma rede em que é possível um veículo operar de forma 100% independente, utilizando-se apenas de informações coletadas e processadas por radares e sensores. Porém para serem eficazes as aplicações desse tipo

de serviço precisam de certos requisitos que visam garantir a segurança e integridade dos usuários.

Uma quantidade mínima de veículos equipados com tais dispositivos é requerida para que seja possível a viabilização de uma rede, que possua veículos equipados com radares de longo e curto alcance para controle de cruzeiro, detecção de obstáculos, assistência ao estacionamento e detecção pré-colisão.

Esses radares são sensores ativos que utilizam amplas faixas de frequência alocadas e também integram um receptor sensível. Para acelerar a implementação desse tipo de serviço as redes 5G terão um importante papel de aprimorar as comunicações veículo a veículo (V2V) e seus radares trabalhando em ondas milimétricas.

As comunicações V2V, como relatado por Heddebaut *et al* [30], são parte integrante dos Sistemas de Transporte Inteligente (ITS - *Intelligent Transport System*). O padrão V2V comumente opera em 5,9 GHz e é baseado no protocolo WAVE (*IEEE 802.11p Wireless Access in Vehicle Environments*)²¹. Os radares de curto alcance (SRR) de ondas milimétricas, são uma solução de serviço V2V eficaz. Com foco nas aplicações de assistência ao motorista e prevenção de colisões, que podem ter um impacto significativo na redução de acidentes.

Dentre os dispositivos que operam com essa tecnologia tem-se os radares de controle de cruzeiro adaptativo (ACC), radares de longo alcance (LRR) e os radares de curto alcance (SRR).

Os SRR operam como um cinto de segurança virtual, usando vários radares e, para executar a função básica do radar, integram um poderoso transmissor e um receptor sensível. Assim, transmitem e recebem sinais de

²¹ IEEE 802.11p é uma emenda aprovada para o IEEE 802.11 padrão para adicionar o acesso sem fio em ambientes veiculares (onda), um sistema de comunicação veicular. Ele define aprimoramentos para 802.11 (a base dos produtos comercializados como Wi-Fi) necessários para oferecer suporte a aplicativos de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Isso inclui a troca de dados entre veículos de alta velocidade e entre os veículos e a infraestrutura rodoviária, chamada de comunicação V2X, na banda ITS licenciada de 5,9 GHz (5,85–5,925 GHz). IEEE 1609 é um padrão de camada superior baseado no IEEE 802.11p. IEEE 802.11p. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11p>. Acesso em: 31 out. 2020.

todas as partes do veículo e também de outros veículos igualmente equipados, estabelecendo um link de geral V2V.

7.2. Da Arquitetura e tecnologia V2V

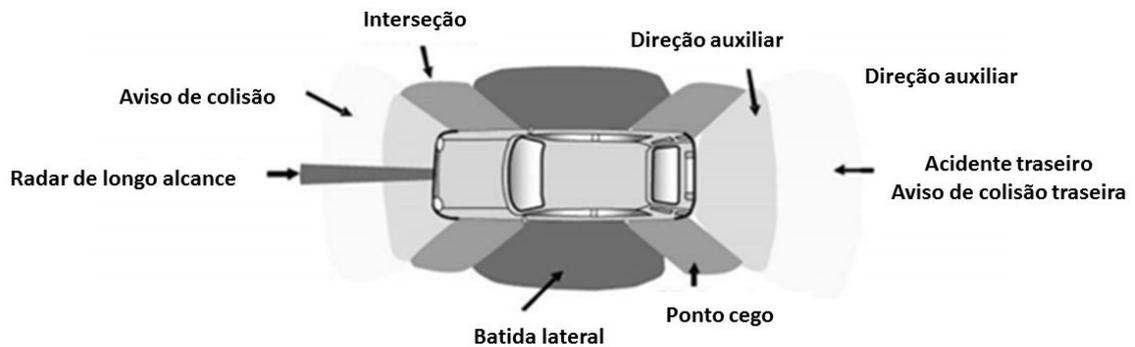
Segundo Heddebaut *et al* [30], afirma que o SRR operando a 79 GHz (ou seja, na faixa de 77 a 81 GHz) requer um alcance de detecção operacional entre 0 e 30 m, e são usados para diversas aplicações, como aprimoramento da segurança ativa e passiva dos usuários na estrada, essa melhora na segurança passiva inclui detecção de obstáculos, aviso de colisão, aviso de partida da pista, auxílio à mudança de faixa, detecção de ponto cego, auxílio ao estacionamento e acionamento do airbag. A combinação dessas funções é referida na literatura como um “cinto de segurança ” para carros.

Os radares de curto alcance combinam as seguintes funções:

- Medições precisas da velocidade alvo usando o efeito Doppler na portadora de frequência de ondas milimétricas.
- Utilização de sinais de banda larga para fornecer informações precisas da faixa radial de objetos com separação de aproximadamente 5 cm. Para tal função faz-se necessário o uso da largura de banda de 4GHz.
- Obtenção de direções dos alvos utilizando-se dois ou mais sensores separados combinados com as técnicas de localização, isto é, medidas dos ângulos de chegada (AOA), hora de chegada (TOA) ou uma associação dessas técnicas.

Portanto, a partir da Figura 15, as velocidades, as distâncias e as direções do alvo serão medidas simultaneamente em todo o veículo.

Figura 15 - Segurança em 360° ao redor do veículo com SRR.



Fonte: [30]

Em ondas milimétricas, os radares automotivos estão localizados nos veículos, muito perto da superfície da estrada, normalmente na altura do para-choque. Conseqüentemente, os feixes SRR são operados em ângulos de passagem sobre a superfície da estrada e recebem sinais refletidos dos veículos circundantes.

Portanto, deve-se avaliar o cenário de ondas milimétricas utilizando-se, por exemplo, um aviso de colisão frontal que se combina a um segundo aviso de colisão traseira ao SRR, como ilustrado na Figura 15, Heddebaut *et al* [30].

Segundo Dickmann *et al* [31], os algoritmos utilizados para o sistema *Vehicle to everything* (V2X) consideram que os cenários urbanos são caracterizados por tempos de reação e observação, distâncias médias livres mais curtas, uma zona de interação e uma grande variedade de tipos de objetos a serem considerados.

Existem vários desafios a serem superados por essa tecnologia, muitos destes devido ao comportamento eletromagnético das estruturas multicamadas de que são feitos os veículos, conforme citado por Dickmann *et al* [31], o processamento de sensores e sinais de radar devem levar em consideração os itens abaixo:

- Características eletromagnéticas do material exterior e tinta (permissividade e perda tangente);

- Tolerância do sensor contra reflexão direta entre peças externas e o sensor
- Design do veículo e formato das peças que cobrem o sensor;
- Tolerância do sensor contra distorção angular devido a transmissão através de peças exteriores;
- Tolerâncias de fabricação (variação de tinta e exterior) espessura do material, bem como variação do material composição);
- Várias camadas de tinta, especialmente reparos;
- Cobertura de peças externas com água, neve, gelo, poeira ou sal, etc;
- Demandas funcionais para campo de visão, faixa de detecção e sensibilidade do sensor de radar.

Como os veículos são vendidos em todo o mundo, a indústria automotiva está muito interessada na harmonização de um mercado mundial destas bandas de frequência e os parâmetros correspondentes.

Os sistemas de monitoramento de proximidade entre veículos irão desempenhar um papel importante para garantir a condução segura. Estes devem ser resistentes ao mau tempo e à sujeira e capazes de operar em condições severas sem que isso afete os subsistemas que o compõem. Os subsistemas são os seguintes:

- Unidade de RF / RFU;
- Unidade de processamento de sinais;
- Unidade de reconhecimento;

Para garantir a integridade dos subsistemas descritos acima os seguintes métodos de radar (com métodos de modulação) são recomendados, segundo ITU-R [32]:

- Método de chirp radar (FM-CW rápido);
- Método de pulso (modulação de pulso);
- Salto de frequência pulsado;
- Método CW de duas frequências (sem modulação ou modulação de frequência);

- Método de espectro de dispersão (espectro de propagação de sequência direta).

7.3. Da recomendação de faixas de frequências

Definido em ITU-R [32], a alocação de frequências na Europa é de responsabilidade da Conferência Europeia dos Correios e Telecomunicações (CEPT).

A frequência de 24 GHz para às comunicações V2V e radares automotivos, foi alocada em caráter temporário e expirou em 2013. Após esse período os SRR migraram para a faixa de 79 GHz utilizando uma largura de banda de 4GHz, Brizzolara [33].

Ainda na Europa, a Comunidade Europeia definiu as alocações de frequência do ITS em ETSI [34]. Dessa forma, uma largura de banda limitada foi disponibilizada na banda de 5,8 GHz.

Em frequências milimétricas, devido à interferência de saturação previsível do radar de longo alcance (LRR) no radar de curto alcance (SRR), uma alocação de banda comum não era viável, pois o radar de curto alcance (SRR) seria bloqueado devido à falta de separação espacial. Assim, a banda específica de 76–77 GHz foi alocada para os radares de longo alcance (LRR) com uma largura de banda de 1GHz, e 4 GHz, entre 77 GHz e 81 GHz, para os radares de curto alcance (SRR). A CEPT também determinou que a banda 77-81 GHz deve ser considerada como a única banda de frequência globalmente harmonizada radares automotivos, o projeto de 79 GHz fundado pela Comissão Europeia envolve atividades específicas em países, bem como um grupo de especialistas - o Grupo de Especialistas em Regulamentos de Rádio Automotivo Internacional - para acelerar essa universalização.

Atualmente, nos 27 Estados-Membros da União Europeia e em todos os outros países membros da Conferência Europeia das Administrações de Correios e Telecomunicações (CEPT), o uso de radar veicular de curto alcance operando na faixa de frequências de 77 a 81 GHz é regulado por ETSI [35]. O equipamento de radar veicular que transmite na faixa de 79 GHz não enfrenta

restrições de tempo nem quaisquer outros encargos de restrição operacional e, portanto, é permitido operar nas proximidades de locais de radioastronomia (em geral, essa operação é proibida).

Como membros da CEPT, Bielorrússia, Geórgia, Federação Russa, Ucrânia, Turquia e região dos Balcãs aprovaram o uso da banda de 79 GHz para radares automotivos de alta resolução e curto alcance, com disposições idênticas às estabelecidas pela Comissão Europeia e por ETSI [35].

Na América do Norte, a FCC no documento ET Docket No. 15-26, FCC 17-94 [36], adotado em 13 de julho de 2017 e divulgado em 14 de julho de 2017 adotou a faixa de a faixa de 76 a 81 GHz para uso de radares veiculares de curto alcance (SRR), Japão e Canadá também possuem a mesma faixa.

Na América Latina, o Brasil ainda não determinou que a faixa de 77 a 81 GHz seja utilizada para os serviços de radar, por isso tem sofrido pressão externa, segundo ABRANET [37], *“Outro tema muito relevante diz respeito aos radares automotivos, frequentemente mencionados como sensores primordiais para a adoção de funções que aumentem conforto e segurança, mas que demandam banda que chega aos 4GHz. Assim, a definição da faixa de 77 a 81 GHz”*, para licenciar essa faixa do espectro.

Ainda no Brasil, de acordo com a Anatel, Equipamentos utilizados em Sistema de Comunicação Veicular, operando na faixa 5.850-5.925 MHz estão submetidos aos requisitos do ATO n° 4776, ANATEL [43].

Na região da Ásia-Pacífico, a China atualmente não possui regulamentação para radares veiculares de alta resolução de 79 GHz, embora a região de Hong Kong esteja dando passos nessa direção. A Agência Nacional de Pesquisa em Rádio da República da Coreia está se preparando para alterar a legislação para aceitar 79 GHz. A Comissão Nacional de Radiodifusão e Telecomunicações da Tailândia deve considerar o assunto. A Comissão de Comunicação e Multimídia da Malásia está trabalhando em um plano de espectro automotivo / banda ultra larga para ser incluído em seu Plano Padrão de Sistema de Rádio. Na Índia, a banda de 79 GHz não é

regulamentada. Na Nova Zelândia, o *Radio Spectrum Management* está considerando adotar a solução da União Europeia.

A faixa de 76-77 GHz foi também adotada pela FCC nos Estados Unidos da América e pelo Ministério de Assuntos Internos e Comunicações (MIC) no Japão para esses propósitos.

Em outubro de 2010, a Federação Russa identificou a faixa de 76 a 77 GHz para radares automotivos. Esse esforço levou o Programa de Normalização da Comunidade da Ásia-Pacífico (ASTAP) a adotar também o padrão para o radar anti-colisão de veículos operando nos 76-77 GHz banda.

7.4. Do escopo de ensaios aplicáveis às comunicações V2V

Segundo ETSI [35] e ETSI [38], os ensaios em radares automotivos devem ser realizados de forma radiada e seguindo as recomendações da cláusula 6.

- *The operating frequency range;*
- *The total power spectral density;*
- *The peak power (e.i.r.p.);*
- *The mean (average) e.i.r.p.;*
- *The mean e.i.r.p. spectral density;*
 - *The power duty cycle;*
 - *The spectrum access duty cycle;*
 - *The dwell time and repetition time;*
 - *The frequency modulation range;*
 - *The unwanted emissions in the spurious and OOB domain;*
 - *The receiver spurious emissions;*
 - *The receiver in-band, out-of-band and remote band signals handling.*

Segundo ITU-R [32], sistemas de radar veicular em ondas milimétricas são classificados em duas categorias, de acordo com a faixa de medição e largura de banda:

- Categoria 1: Cruise Control Adaptativo (ACC) e radar para evitar colisões (CA), operando na faixa de 76 a 77 GHz, para faixas de medição de até 300 m.
- Radar de categoria 2 de curto alcance para aplicações como detecção de ponto cego (BSD), *Lane Change Assist* (LCA) e alerta de cruzamento de tráfego traseiro (RTCA), operando na faixa 77-81 GHz para faixas de medição de até 100 m.

A lógica para separar essas aplicações em duas bandas de frequência diferentes é dada no ECC - Relatório 56, e revela que o compartilhamento não é possível entre Categoria 1 e Categoria 2 se operado em uma banda de frequência comum.

7.5. Dos métodos de ensaios aplicáveis em CR

A CR é muito utilizada para ensaios OTA em dispositivos sem fio. Dentre os parâmetros utilizados em medição, pode-se citar o TRP e o TIS descritos no item 3.

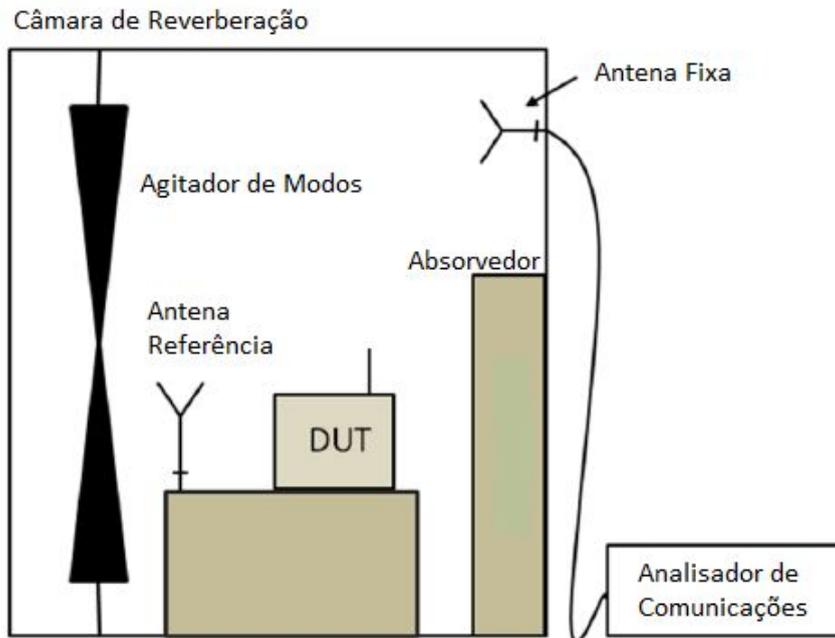
7.5.1. TRP e TIS

Segundo Chen *et al* [39], estes parâmetros serão extremamente críticos e fundamentais para ensaios de desempenho em dispositivos que implementam as tecnologias trazidas com o 5G como comunicação máquina a máquina (M2M) e internet das coisas (IoT). Ensaios em dispositivos M2M de fator de forma grande para ambientes de CR estão descritos no documento do CTIA [19].

Uma configuração típica das medições TRP e TIS é mostrada na Figura 16. Quanto mais elementos são inseridos na CR e o espaço físico da mesma é

ocupado, é constatada melhora na propagação e contribui para redução do atraso devido ao espalhamento. Antes de medições do DUT, uma antena referência é usada para medir a função média de transferência de potência (ou seja, medição de referência) na CR.

Figura 16 - *Setup* de ensaio para medições de TRP e TIS



Fonte: [39]

Segundo o CETECOM [42], para medições de TRP, o Analisador de Comunicações, primeiro deve-se estabelecer uma conexão OTA com o DUT e controlá-lo para irradiar em sua potência de saída máxima, e então medir o sinal de potência em cada estado de agitação de modo. O TRP é calculado através da equação (11):

$$TRP = \frac{1}{P_{ref}} \cdot \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_m \quad (11)$$

Onde M é o número de amostras, P_m é a medida de potência no *m-ésimo* estado de agitação de modo, e P_{ref} é a função transferência de

potência média (incluindo perda de transmissão, perda de cabo, incompatibilidade) da medição de referência.

De acordo com Chen *et al* [39], para ensaio de TIS, o Analisador de Comunicações, primeiro estabelece uma conexão OTA ao DUT e é configurado no modo *loopback* para medição da taxa de erro. Se aumentar ou diminuir a potência de saída do Analisador de Comunicações até a menor potência de saída para uma taxa de erro especificada, então, pode-se encontrar e registrar a medição. O mesmo procedimento é repetido em cada estado de agitação de modo. O TIS é calculado através da equação (12):

$$TIS = P_{ref} M \left(\sum_{m=1}^M \frac{1}{\tilde{P}_m} \right)^{-1} \quad (12)$$

Onde \tilde{P}_m é a medida de menor potência de saída do Analisador de Comunicações no *m-ésimo* estado de agitação de modo, onde a taxa de erro é atingida. Ao contrário do TRP que é a média aritmética das amostras (medidas), o TIS é a média harmônica das amostras (medidas). Uma vez que a medição padrão TIS descrita acima requer uma busca de energia em cada um dos estados de agitação, a medição do TIS pode consumir muito tempo, Chen *et al* [39].

7.6. Dos impactos dos requisitos de ensaios e normas disponíveis

Segundo o CETECOM [42], Com os avanços na direção autônoma, o número de sensores de radar necessários em um veículo por motivos de redundância e precisão está aumentando, incluindo sensores de radar de ponto cego, funcionalidade de parada e uso, controle automático de velocidade e sistemas de assistência na faixa. Esses aplicativos usam diferentes faixas de frequência:

76 a 77 GHz

- Controle de cruzeiro adaptável

- Alerta de tráfego cruzado dianteiro
- Detecção de ponto cego, assistência na mudança de faixa, alerta traseiro de tráfego cruzado, pré-travamento traseiro, assistência de saída

77 a 81 GHz

- Ainda está em fase de regulamentação.

Os ensaios definidos para sistemas automotivos, segundo [40] são:

Maximum Power Reduction (MPR) for V2X communication

Occupied bandwidth for V2X Communication

Transmit intermodulation for V2X Communication

EVM for V2X communication

7.7. Da definição de FoM (Figura de Mérito) em ensaios V2V OTA

Os requisitos para radares possuem enfoque em determinar e estabelecer parâmetros para a qualidade do serviço que o dispositivo fornece.

Segundo o *U.S. Department of Transportation National Highway Traffic Safety Administration* [41], três figuras de mérito têm impacto direto no desempenho de detecção e rastreamento de qualquer sistema de radar:

A primeira refere-se a estabilidade do alvo. Inicialmente define-se os requisitos de característica do pulso e varredura do radar. Em uma forma pulsada o radar detecta um rápido feixe de energia seguido por um intervalo de recepção relativamente longo. O tempo total desde o início de um pulso até o início do próximo pulso é denominado “intervalo entre pulsos”, já um pulso emitido em determinado ângulo de visão, é contabilizado até que o mesmo ângulo de visão seja repetido, denominado “intervalo de varredura”. A instabilidade do alvo é uma importante métrica que influencia diretamente na qualidade e precisão dos radares, quanto melhor a resolução do radar maior sua velocidade de captura.

A segunda das três métricas é o valor esperado da seção transversal do radar observada ao longo do intervalo de ângulos e frequências. Supondo que o alvo tenha uma instabilidade suficientemente baixa, o RCS - *radar cross*

section esperado do alvo fornece uma noção de quão grande a potência refletida do alvo aparecerá para o radar. Embora essa figura de mérito falha em capturar o modelo estatístico de flutuação completo, é relevante porque com uma amostra limitada de veículos é possível caracterizá-la em um modelo estatístico.

A terceira das três métricas demonstra o modelo de flutuação estática representado por um ângulos e frequências. Este modelo representa a flutuação angular de banda larga, baseado nos parâmetros de melhor ajuste para a distribuição de *Weibull*²² para a seção transversal do radar observada ao longo dos ângulos de amplitude das frequências.

8. CONCLUSÕES

O espectro é um recurso natural e escasso, que é regulado por agências competentes ao redor do mundo, que por sua vez realizam a alocação de espectro para serviços de telecomunicações. No entanto, com o avanço tecnológico crescente dos produtos de telecomunicações, têm-se que os procedimentos existentes para qualificação e certificação de produtos são realizados através de ensaios de forma conduzida ou radiada em CA. Estes métodos não se aplicam a dispositivos que operam em ondas milimétricas e surgem como alternativa para dispositivos que operam em frequências de até 6 GHz. Com base nisto, há o desafio de desenvolvimento de procedimentos e dispositivos simplificados, que permitam a realização de ensaios com tempo de *set-up* mínimos, promovendo ensaios rápidos e de baixo custo.

Desta forma os métodos de ensaios OTA podem ser aplicáveis para diversos tipos de dispositivos destinados aos serviços mais variados, como, de comunicação pessoal, de internet das coisas e embarcados em veículos autônomos.

Neste trabalho buscou-se demonstrar a efetividade e a viabilidade dos ensaios OTA aplicados à ensaios de certificação e qualificação. Avaliou-se

²² Em probabilidade e estatística a distribuição de *Weibull* é uma distribuição de probabilidade contínua. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribuição_de_Weibull>. Acesso em: 29 out. 2020.

características de propagação no espaço livre e em ambientes de multipercursos e o cenário de ensaios OTA aplicados à CR. Ainda assim, foi feita uma PdC, sendo que, foram observados os parâmetros importantes na construção de uma CR, como o Fator Q, a LUF, as dimensões, a ZCU, os agitadores de modos, antenas e equipamentos de medição. Discutiu-se os principais ensaios e métodos de medição de sinais de radiofrequência em uma CR.

Uma das principais dificuldades encontrada durante a realização de medições e caracterização da PdC, foi o posicionamento da antena, em que foi necessário abrir e fechar a tampa para alterar pontos e plano de medidas. Isso aumenta a incerteza, além de não haver um mecanismo que permita posicionar um possível DUT no interior da CR, devido a isso durante a concepção ficou claro que será necessário alterações na arquitetura do projeto. Segundo o livro *Anechoic and Reverberation Chamber. Theory, Design and Measurement* uma CR de dimensões maiores pode ser melhor adequada aos objetivos, visto que a incerteza ao posicionar a antena pode ser minimizada se um mecanismo de controle externo à CR for desenvolvido, além de permitir o uso de agitadores com formatos diferentes e móveis, o acesso dos operadores ser realizado por uma porta devidamente selada pode fornecer um ambiente de maior controle para posicionamento das antenas e possibilitar análises minuciosas a respeito dos efeitos de propagação em frequências mais elevadas.

Além disso, as medições realizadas levaram em conta os limites definidos na IEC 61000-4-21, que é aplicável a ensaios de EMC realizados em CR. No entanto, para um projeto futuro, o ideal seria realizar as medições e caracterização da CR para ensaios funcionais utilizando as técnicas mencionadas no Estado da Arte e métodos de ensaios descritos nas Aplicações.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] BRASIL. **LEI Nº 9.472**, de 16 de julho de 1997. Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 julho 1997. Cap. 1, art. 157º e 158º.

[2] Agência Nacional de Telecomunicações, ANATEL.: **Radiofrequência**. 2019. Disponível em: <<https://www.anatel.gov.br/setorregulado/index.php/component/content/article?id=224>>. Acesso em: 29 fev. 2020.

[3] BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações. **Resolução nº 671**, de 3 de novembro de 2016. Aprova o Regulamento de Uso do Espectro de Radiofrequências e altera o Regulamento de Cobrança de Preço Público pelo Direito de Uso de Radiofrequências e o Regulamento de Aplicação de Sanções Administrativas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 novembro 2016. Anexo 1, Cap. 3, art. 10º.

[4] BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações. **Resolução nº 715**, de 23 de outubro de 2019. Aprova o Regulamento de Avaliação da Conformidade e de Homologação de Produtos para Telecomunicações. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 outubro 2019. Cap. 2, art. 3º.

[5] Conceição Santana da Silva, Ítala. **Do 1G ao 5G: Evolução das redes de telefonia móvel**, 2016.

[6] International Telecommunications Union, ITU. **Spectrum Allocation for 5G International Framework**. 2019. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2019/RED-2019/presentation/4.5-%D0%A0%D0%B5%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BE.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2020.

[7] International Telecommunication Union, ITU. **Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges**. 2018. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Documents/ITU_5G_REPORT-2018.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2019.

[8] European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI EN 302 264 V2.1.1**. 2017. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/302264/02.01.01_60/en_302264v020101p.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2020.

- [9] Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, MCTIC. **ESTRATÉGIA BRASILEIRA DE REDES DE QUINTA GERAÇÃO (5G)**. 2019. Disponível em: <<https://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/sessaoPublica/arquivos/estrategia5g/Documento-base-da-Estrategia-Brasileira-de-5G.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2019.
- [10] Wright Charles. **Testing True Mobile Device Performance with Advanced Over-the-Air Testing**. Disponível em: <<https://www.microwavejournal.com/ext/resources/BGDDownload/1/1/Azimuth-Systems-Testing-True-Mobile-Performance.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2020.
- [11] Xu, Quian e Huang, Yi. **Anechoic and Reverberation Chamber. Theory, Design and Measurement**. Wiley-IEEE Press. Jan. 4, 2019. p. 1-174.
- [12] Aرسالane Nabil. 2014. **Channel Emulation for active characterization of MIMO communication systems**. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01161788/document>>. Acesso em: 01 mai. 2020.
- [13] Keysight Technologies. 2020. **Engineering the 5G World**. Disponível em: <<https://www.keysight.com/br/pt/assets/7119-1223/ebooks/Engineering-the-5G-World.pdf>>, Acesso em: 12 jun. 2020.
- [14] 3rd Generation Partnership Project, 3GPP. **Release 15**, 2018. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-15>>. Acesso em: 06 de fev. 2020.
- [15] XIAOMING, Chen. **Reverberation Chambers for Over-the-Air Tests: An Overview of Two Decades of Research**. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327200730_Reverberation_Chamberts_for_Over-the-Air_Tests_An_Overview_of_Two_Decades_of_Research>. Acesso em: 01 mar. 2020.
- [16] CTIA ERP, **Test Plan for Mobile Station Over the Air Performance v1.0**, October 2001.
- [17] Rumney Moray, PirkI Ryan, Landmann Markus Herrmann Landmann, e Sanchez-Hernandez David A. Sanchez-Hernandez. 2012. **MIMO Over-The-Air Research, Development, and Testing**. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijap/2012/467695/>>. Acesso em: 19 abr. 2020.
- [18] 3GPP. 2006. **Medições de performances de rádio para terminais UMTS no modo de fala**, Tech. Rep. 25.914, 2006, v.7.0.0.
- [19] Cellular Telecommunications and Internet Association, CTIA. **“Test Plan for Wireless Device Over-the-Air Performance”** October 2018. Disponível em:

<<https://api.ctia.org/wp-content/uploads/2018/05/ctia-test-plan-for-wireless-device-over-the-air-performance-ver-3-7-1.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2020.

[20] 3GPP, **Medições de desempenho irradiado para recepção MIMO e multi-antena para terminais HSPA e LTE**, Tech. Rep. 37.976, 2012, v11.0.0.

[21] 3GPP TR 25.996 v13.0.0 **“Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations”**. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/125900_125999/125996/13.00.00_60/tr_125996v130000p.pdf>. Acesso 04 Abr. 2020.

[22] Xin Lijian; Li Yong; Sun Hao; Zhang Xiang. **OTA Testing for Massive MIMO Devices Using Cascaded APM Networks and Channel Emulators**. 2019. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijap/2019/6901383/#references>>. Acesso em: 19 abr. 2020.

[23] Keysight. **Testing 5G New Radio Device**. 2018. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-3413EN.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2019.

[24] MicroWave Journal. **EBook 5G Over the Air Testing (OTA) - Desafios e Soluções** 2019. Disponível em: <<https://www.microwavejournal.com/articles/32039-g-over-the-air-testing-ota-challenges-and-solutions>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

[25] SILVA, Erik Farias da. **Uma Proposta de Maximização da Região de Campo Uniforme para uma Câmara de Reverberação Compacta**. 2008. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2008.

[26] International Electrotechnical Commission, IEC. **“Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods**. Edition 2.0, 2011-01.

[27] Quan Sun, Jinlong Wang, Jian Cui, Jiahui Fu, Changfei Zhou, Erchao Wang, **"A compacta impressa log-periódica antena com stub carregado"**, Antenas e Propagação (APCAP) 2014 3rd Asia-Pacific Conference on , pp. , 2014.

[28] Antenas de placa de circuito impresso - Registro periódico. **Kent Electronics**, 2006. Disponível em: <<https://www.wa5vjb.com/products1.html>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

[29] Gallas, Marcia Russman, **“Incerteza de Medição”**, Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/~marcia/>>, Acesso em 11 Out. 2020.

- [30] HEDDEBAUT, M., ELBAHHAR, F., LOYEZ, C., OBEID, N., ROLLAND, N., RIVENQ, A., e ROUVAEN, J. M. (2010). **Millimeter-wave communicating-radars for enhanced vehicle-to-vehicle communications**, 18 (3), 440–456. doi: 10.1016 / j.trc.2009.05.004.
- [31] DICKMANN, J., APPENRODT, N., KLAPPSTEIN, J., BLOECHER, H. L., MUNTZINGER, M., SAILER, A., BRENK, C. (2015). **Making Bertha See Even More: Radar Contribution**. *IEEE Access*, 3, 1233–1247. doi: 10.1109 / acesso.2015.2454533.
- [32] International Telecommunication Union. (2012). ITU-R M.1452-2: **Millimetre wave vehicular collision avoidance radars and radiocommunication systems for intelligent transport system applications**. Disponível em: <<http://www.itu.int>>. Acesso em: 30 jul. 2020.
- [33] BRIZZOLARA, Davide. **Tendências futuras para radares automotivos: Rumo à banda de 79 GHz**. 2013. Disponível em: <<https://itunews.itu.int/en/3935-Future-trends-for-automotive-radars-Towards-the-79GHz-band.note.aspx>>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- [34] European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI TR 101 982 V1.2.1**. 2002. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102200_102299/102263/01.01.02_60/tr_102263v010102p.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- [35] European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI EN 302 264 V2.1.1**. 2017. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/302264/02.01.01_30/en_302264v020101v.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- [36] ET Docket No. 15-26, FCC 17-94, adotado em 13 de julho de 2017 e divulgado em 14 de julho de 2017.
- [37] ABRANET, Associação Brasileira de Internet. **ABRANET: Espectro não licenciado – manter a destinação de frequências alinhada com mercado mundial é essencial para o futuro da Internet**. 2019. Disponível em: <<http://www.abranet.org.br/Noticias/ABRANET:-Espectro-nao-licenciado---manter-a-destinacao-de-frequencias-alinhada-com-mercado-mundial-e-essencial-para-o-futuro-da-Internet-2587.html?UserActiveTemplate=site#.XpOcDMhKjIU>>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- [38] European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI EN 303 396 V1.1.0**. 2016. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/303300_303399/303396/01.01.00_20/en_303396v010100a.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2020.

[39] Chen, Xiaoming & Tang, Jiazhi & Li, Teng & Zhu, Shitao & Ren, Yuxin & Zhang, Zhihua & Zhang, Anxue. **Reverberation Chambers for Over-the-Air Tests: An Overview of Two Decades of Research**. 2018. IEEE Access. PP. 10.1109/ACCESS.2018.2867228.

[40] European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI TS 136 521 V15.2.0**. 2018. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136500_136599/13652101/15.02.00_60/ts_13652101v150200p.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2020.

[42] Consulting, testing, certification, CETECOM. **CETECOM conclui os testes regulatórios do primeiro dispositivo V2X baseado em LTE**. 2019. Disponível em: <<https://www.cetecom.com/en/news/cetecom-completes-regulatory-testing-of-first-lte-based-v2x-device/>>. Acesso em: 25. abr. 2020.

[43] BRASIL. Agência Nacional de Telecomunicações. **ATO nº 4776**, de 01 de setembro de 2020. Altera os seguintes itens do Anexo I do Ato nº 14.448, de 04 de dezembro de 2017, que aprovou os Requisitos Técnicos para a Avaliação da Conformidade de Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita, que passam a vigorar com a seguinte redação. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 01 setembro 2020. Item. 22, par. 1º.

10. BIBLIOGRAFIA ADICIONAL

- IEEE. **IEEE Std 802.11ad**. 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6392842>>. Acesso em: 04 abr. 2020.
- International Telecommunication Union, ITU-R M.2083-0. **IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**. 2015. <<https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083>>. Acesso em: 23 fev. 2020.
- SILVA, Eloy André; RODRIGUES, Paulo Renato; MELO, Jair Cândido. **MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA FIGURA DE MÉRITO (G/T)**. 2007. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2007/trabalhos/engenharias/inic/INICG00662_01O.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2020
- MASSAGARDI, Matheus G.; CONFORTI, Evandro. **Medidas de ruído em chips de amplificadores ópticos a semicondutor (SOA) em altas taxas**. 2009. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xviiicongresso/paineis/063094.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2020.
- European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI TS 137 544 V14.7.0**. 2018. Disponível em:

<https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/137500_137599/137544/14.07.00_60/ts_137544v140700p.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2020.

- KILDAL, Per-Simon. **OTA testing of 3G-5G devices with MIMO: From anechoic chambers to reverberation chambers and ... back again?** 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320663258_OTA_testing_of_3G-5G_devices_with_MIMO_From_anechoic_chambers_to_reverberation_chambers_and_back_again>. Acesso em: 01 mar. 2020.
- European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI TS 136 521-1 V15.2.0 (2018-10)**. 2018. Disponível em: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136500_136599/13652101/15.02.00_60/ts_13652101v150200p.pdf. Acesso em 04 Abr. 2020.
- European Telecommunications Standards Institute, ETSI. **ETSI TR 102 263 V1.1.2 (2004-02)**. 2004. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102200_102299/102263/01.01.02_60/tr_102263v010102p.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE. **IEEE Std 802.11**. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6392842>>. Acesso em: 04 abr. 2020.
- 3rd Generation Partnership Project, 3GPP. **Release 14**, 2017. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/release-15>>. Acesso em: 06 de fev. 2020.
- Ya Jing, Xu Zhao, Hongwei Kong , Steve Duffy, and Moray Rumney. 2012. **Two-Stage Over-the-Air (OTA) Test Method for LTE MIMO Device Performance Evaluation**. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ijap/2012/572419/>>. Acesso em: 19 abr. 2020
- [43] 3GPP, **Transmissão e recepção de rádio de Equipamento de Usuário (UE) - Faixa 2 independente**. TS 38.101-2, 2020, v16.5.0.
- 3GPP, **Transmissão e recepção de rádio de Equipamento de Usuário (UE) - Requisitos de desempenho**. TS 38.101-4, 2020, V15.5.0.
- 3GPP, **Teste de conformidade da Estação Base (BS) - Teste de conformidade irradiado**. TS 38.141-2, 2020, V16.3.0.
- Kalevi Kilkki. **“Qualidade da Experiência em Ecossistema de Comunicações”**. Disponível em: <http://www.jucs.org/jucs_14_5/quality_of_experience_in/jucs_14_05_06_15_0624_kilkki.pdf>. Acesso em: 29 Fev. 2020.
-

- International Telecommunication Union. (2016). ITU-T P.10/G.100 Amendment 5: New definitions for inclusion in Recommendation ITU-T P.10/G.100. [Online]. Available: <http://www.itu.int>.
- MEIRA, ANDRÉ; CORREIA, MIGUEL. **Tendências da Rede 5G**. 2018. Disponível em: https://www.academia.edu/37707452/Tend%C3%AAsncias_da_Rede_5G. Acessado em: 12 set. 2020.
- MOTA, Kim Moraes. “**Análise da capacidade de canal para futuras redes de comunicação sem fio com rádio cognitivo e ondas milimétricas**”. 2015. [117] f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Universidade de Brasília, Brasília, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/19717>. Acesso em 01 Nov. 2020.
- Keysight Technologies. “**5G Beamforming: Como testar Cls Beamformer Complexos**”. Disponível em: https://blogs.keysight.com/blogs/inds.entry.html/2019/05/31/5g_beamforming_how-JPG6.html. Acesso em 01 Nov. 2020.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DE ENSAIOS

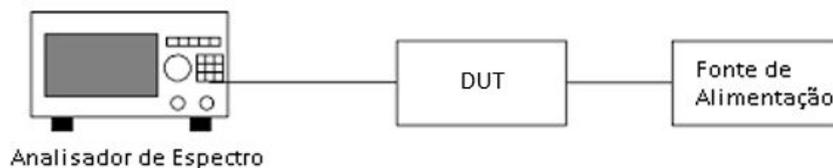
Ensaio Conduzidos

Ensaio conduzidos são testes de RF em que o equipamento de teste está conectado diretamente ao conector de antena do DUT (*Device Under Test*) por cabos coaxiais, com as impedâncias devidamente casadas, conforme ilustra a Figura 17. Esses ensaios são formulados com a finalidade de medir o desempenho básico de dispositivos de RF como sensibilidade e potência de transmissão.

Os sinais são gerados no transmissor e se propagam por um meio confinado, cabo coaxial, conectando-se diretamente à entrada da estação base/analizador de espectro.

O objetivo é mensurar a potência máxima fornecida pelo DUT diretamente na saída do transmissor, também é possível realizar medidas de desvio de frequência, densidade de potência e largura de banda com essa configuração.

Figura 17 - *Setup* de Ensaio Conduzido



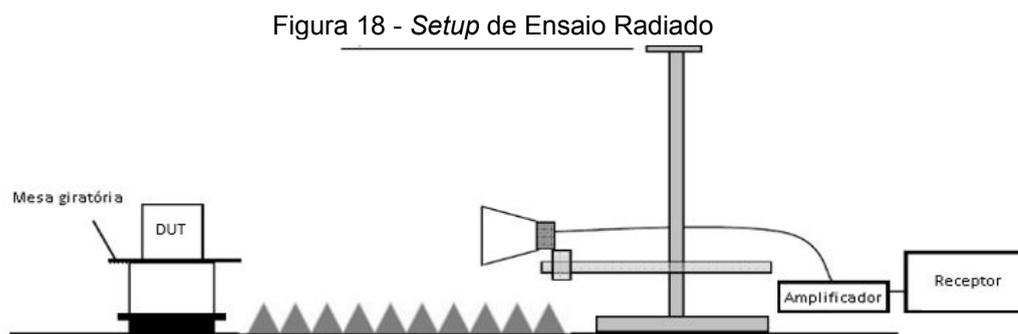
Fonte: Do próprio autor

Ensaio Radiados

Ensaio radiados são aqueles realizados em um ambiente capaz de emular características reais para propagação do sinal eletromagnético, por exemplo um campo aberto, porém sem a presença de ondas interferentes normalmente existentes no meio, como por exemplo ondas de rádio, e deve-se também garantir que as ondas não sejam refletidas por objetos vizinhos, mensurando o desempenho do DUT por meio de elementos receptores do sinal irradiado por suas antenas, conforme Figura 18.

Os sinais se propagam da estação base/testador de comunicação para o DUT, possibilitando medir/gerar um campo eletromagnético próximo utilizando antenas de recepção/transmissão ao redor do equipamento, que fica sobre uma mesa giratória e ao rotacionar o DUT permite medidas em diversas posições. Também pode ser simulada uma distribuição espacial dos ângulos de chegada com a finalidade de analisar o comportamento do DUT em um ambiente de múltiplos caminhos e também mensurar a intensidade irradiada em todas as faces do equipamento.

O objetivo é verificar a imunidade dos dispositivos a interferências externas e também mensurar a intensidade de campo eletromagnético emitido pelos DUTs além de verificar emissões fora da faixa especificada pelos organismos certificadores.



Fonte: Pagina da Internet²³

²³ EMTEK. **Test Set-up**. Disponível em: <<https://fccid.io/png.php?id=3316940&page=17>> Acesso em: 29 fev. 2020

APÊNDICE B - PROJETO DA CR**Paredes da CR**

Figura 19 - Parede Eixo Z

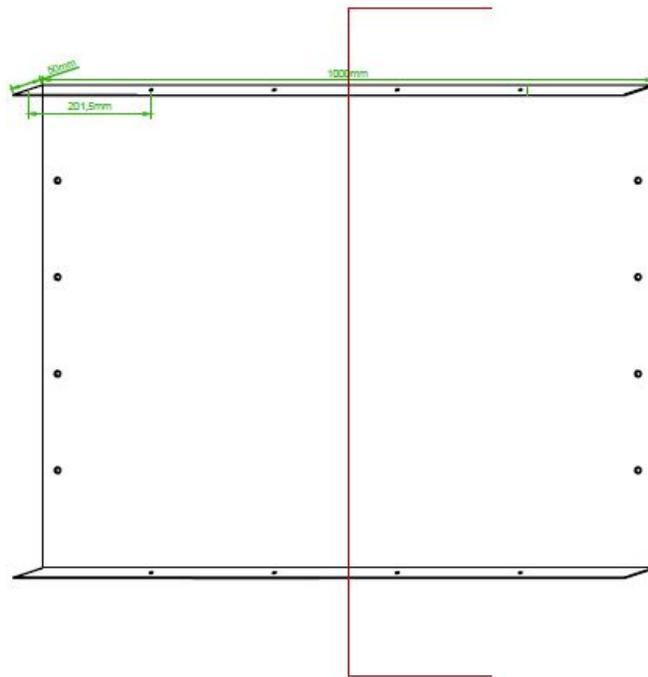


Figura 20 - Parede Eixo Y

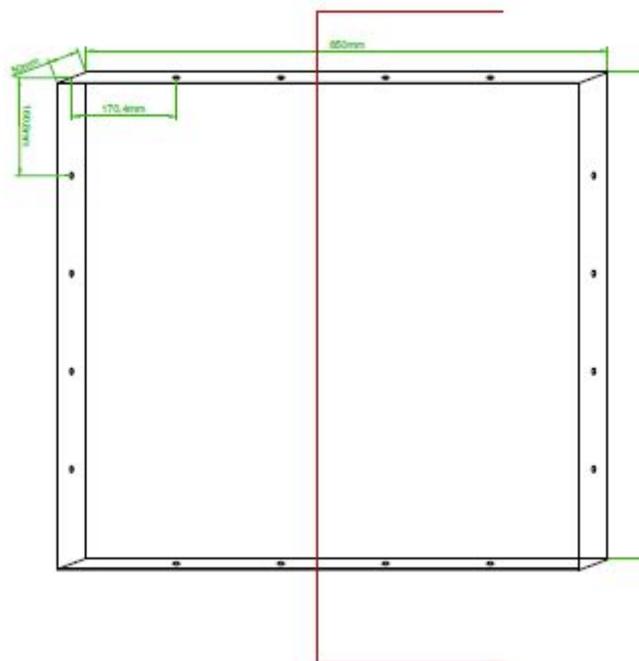
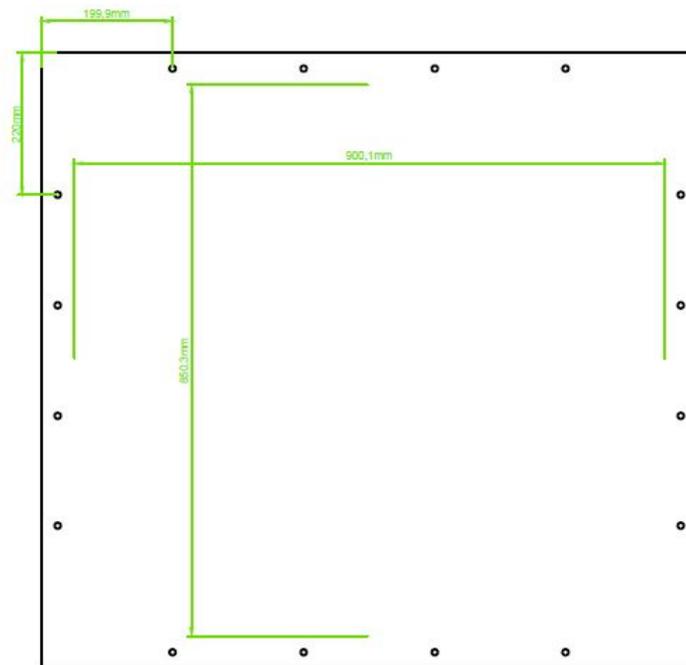
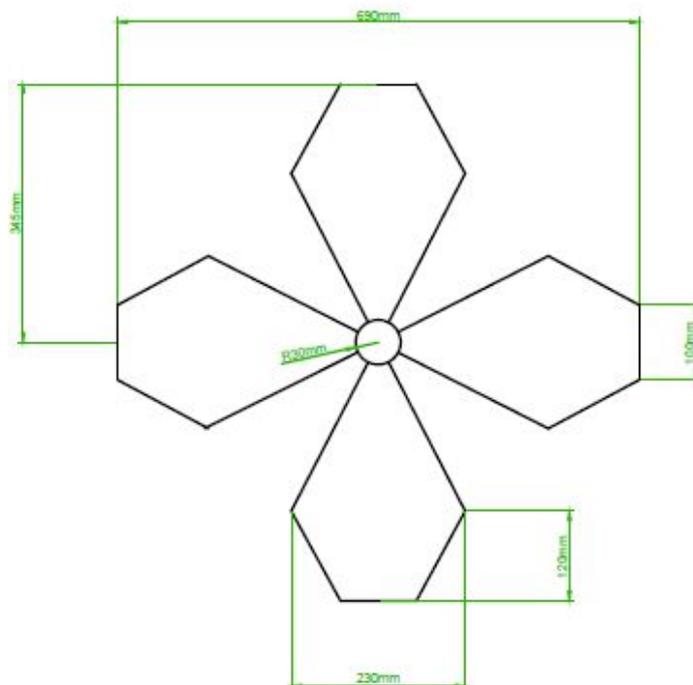


Figura 21 - Parede Eixo X



Agitador de Modos

Figura 22 - Agitador de Modos



ANEXO A - PRODUTOS COMERCIAIS E DEMANDA PARA ENSAIOS OTA

Segundo o Microwave Journal [23], para a realização dos ensaios de 5G NR novas tecnologias são necessárias visando contemplar a faixa de frequências com ondas milimétricas. Diversas soluções já estão no mercado com essa finalidade, abaixo temos alguns exemplos:

Em 2018 a Rohde & Schwarz apresentou a ATS-1000 que é uma câmara de ensaios RF blindada, compacta e móvel.

- Permite caracterizações de antenas de campo distante e medições iniciais de RF para 3GPP 5G NR na faixa do comprimento de onda milimétrica.
- Trabalha de 18 GHz - 87 GHz.
- Se combinada com um sistema de ensaio de RF R&S TS8980 5G, podem-se determinar parâmetros de RF relevantes (por exemplo, potência, ACLR e EVM) a partir de medições OTA.
- O sistema permite uma caracterização 3D abrangente, medições de verificação e ensaios funcionais de componentes 5G.

A ETS-Lindgren oferece a série AMS-5700 de câmaras de ensaio OTA. A série é altamente flexível, oferecendo um sistema que atende a vários projetos e casos de uso.

- Configurações de campo remoto diretas e indiretas que abrangem qualquer tamanho de matriz até 60 cm.
- Projetado com uma grande zona silenciosa e um sistema de posicionamento exclusivo para acomodar futuros requisitos de ensaio da CTIA.

A Keysight possui soluções CATR que oferecem medições IFF para RF, testes paramétricos de RF e medições de padrões de antenas, adequadas para ensaios de antenas, telefones, phablets, tablets, laptops e pequenos gNBs de 5G.

- Capaz de testar dispositivos sob condições reais de operação, a solução emula diferentes direções de chegada do sinal 5G, ou seja, emula as características espaciais do ambiente.
- Os modelos da Keysight sinalizam da estação base (gNB) para o dispositivo.
- As soluções de câmara anecóica com várias sondas são boas para entender como um dispositivo opera no ambiente espacial com vários ângulos de feixe irradiados simultâneos.

A MVG oferece sistemas de várias sondas com base em amostragem rápida, usando matrizes de sondas do campo próximo irradiado em amplitude e fase em uma superfície fechada ao redor do dispositivo. Oferece grandes sistemas que podem acomodar estações-base inteiras, até veículos, como é o caso do SG3000F.

- Os sistemas com várias sondas da MVG permitem ensaios muito mais rápidos que os sistemas tradicionais de uma única sonda.
- Recursos de pós-processamento de medição permitem que os usuários examinem os resultados e entendam melhor as propriedades de radiação do dispositivo.
- Possui feeds de alto desempenho, projetados especificamente para manter a alta pureza das ondas planas da zona silenciosa em larguras de banda muito amplas.
- Tem um posicionador, projetado para interferência mínima no dispositivo, tornando-o utilizável também para ensaios de dispositivos portáteis menores.

Os produtos da NSI-MI Technologies para ensaios 5G incluem sistemas de campo próximo e CATR. Para ensaios de campo próximo, o NSI-MI recomenda ensaios de padrão apenas com tons CW, quando possível. O SNF-FIX-1.0 é um sistema esférico de campo próximo que gira uma sonda para qualquer posição em uma esfera até $\theta \leq 150^\circ$ em torno de um DUT estacionário. Faz isso com um braço articulador de estágio rotativo duplo.

- Capacidade de amostrar padrões de campo próximo sem a necessidade de qualquer tipo de rotação do DUT.
- Podem lidar com frequências em ondas milimétricas de até 110 GHz.

A Anritsu apresentou o Field Master™ Pro MS2090A, primeiro instrumento portátil de campo com cobertura de frequência contínua para sub-3 GHz, sub-6 GHz e medições em ondas milimétricas 5G NR).

- Cobertura de frequência contínua de 9 kHz a 9, 14, 20, 32, 44 ou 54 GHz.
- Largura de banda de análise de 100 MHz para implantações atuais de 5G.
- Recursos de demodulação 5G NR.
- EIRP integrado e varredura fechada para ensaio de transmissão.

O EMITE oferece um ampla gama de soluções. A série PT EMITE é uma pequena câmara de reverberação que serve como um ensaio simples, em ondas milimétricas SISO OTA e alguns sinais de não sinalização ensaio OTA de produção para até oito DUTs simultâneos de até 15 cm. A série E é uma câmara de reverberação de tamanho médio capaz de fornecer ensaios 5G OTA totalmente automatizados de alguns indicadores-chave de desempenho isotrópicos, além de latência e taxa de transferência.

- Podem acomodar muitas operadoras com tecnologias 4G e 5G, com até 8 × 8 MIMO, e pode usar o canal emuladores para modelagem de canal 5G.
- Podem ser conectadas em cascata para ensaios MIMO e E2E OTA, representando um primeiro passo para ensaio de sinalização 5G OTA.
- A Série F é uma câmara híbrida-reverberação-aneecóica capaz de fornecer uma mistura dos dois mundos. O modo RC fornece fácil, totalmente automatizado ensaio noturno de 4G e 5G OTA enquanto o modo AC incorpora todos os métodos de teste OTA permitidos para 3GPP (IFF, NFTF e DFF) para DUTs de até 1,5 m.