

TESTE E AVALIAÇÃO DA CÂMARA ANECOICA DO INSTITUTO DE PESQUISAS DA MARINHA PARA O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS DE GUERRA ELETRÔNICA

Testing and evaluation of the Brazilian Navy Research Institute anechoic chamber for the development of electronic warfare systems

Vivian Barreiros Cosenza¹ , André Paim Gonçalves² ,
Ricardo Ribeiro Rodrigues³, Rogerio do Nascimento Rebello Filho⁴

Resumo: Medidas de caracterização e calibração de dispositivos, tais como antenas, receptores e geradores, necessitam de um ambiente controlado, sem interferência de sinais indesejados. Nesse contexto, a câmara anecoica é um ambiente que fornece essas condições. Sua estrutura consiste em uma caixa metálica projetada para funcionar como uma gaiola de Faraday, revestida internamente com material absorvedor de radiação eletromagnética. O Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM) possui uma câmara anecoica, que é de grande relevância para os projetos de sistemas de guerra eletrônica desenvolvidos na instituição. Neste trabalho, dois testes foram propostos e executados para avaliar o correto funcionamento da câmara anecoica do IPqM: o de blindagem eletromagnética, que analisa se a câmara atua como uma gaiola de Faraday, e o de multicaminho, que verifica se as espumas absorvedoras são eficientes na atenuação das ondas refletidas internamente. Ambos os testes apresentaram resultados satisfatórios, confirmando o adequado funcionamento da câmara em questão.

Palavras-chave: Câmara anecoica. Medições de antenas. Material absorvedor de radiação eletromagnética. Blindagem eletromagnética. Multicaminho.

Abstract: Characterization and calibration measurements of devices such as antennas, receivers, and generators require a controlled environment free from unwanted signal interference. In this context, the anechoic chamber provides these conditions. Its structure consists of a metal box, designed to function as a Faraday cage, lined with electromagnetic wave-absorbing foam. The Brazilian Navy Research Institute (IPqM) has an anechoic chamber that is highly relevant to the electronic warfare systems projects developed at the institution. In this work, two tests were proposed and carried out to assess the proper functioning of the IPqM anechoic chamber: the electromagnetic shielding test, which evaluates whether the chamber acts as a Faraday cage, and the multipath one, which verifies whether the absorbing foam effectively attenuates internally reflected waves. Both tests yielded satisfactory results, confirming the adequate functioning of the chamber.

Keywords: Anechoic chamber. Antenna measurements. Electromagnetic radiation-absorbing material. Electromagnetic shielding. Multipath.

1. Primeiro Tenente, Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Eletromagnetismo Aplicado do Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: vivian.cosenza@marinha.mil.br

2. Capitão de Mar e Guerra, Doutor em Ciências e Tecnologias Espaciais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Bolsista da Divisão de Eletromagnetismo Aplicado, do Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: andrepg43@gmail.com

3. Primeiro Tenente, Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Eletrônica e Computação do Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: ricardo.ribeiro@marinha.mil.br

4. Engenheiro Contratado, Mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Ajudante da Divisão de Eletromagnetismo Aplicado do Grupo de Guerra Eletrônica do Instituto de Pesquisas da Marinha, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: rogerio.rebello@marinha.mil.br

1. INTRODUÇÃO

Uma câmara anecoica é um ambiente fechado que simula o espaço livre. Ela é especialmente projetada para possuir uma blindagem completa e capacidade de atenuar reflexões causadas por ondas eletromagnéticas internas (Holloway *et al.*, 1997). As câmaras anecoicas são utilizadas em diversos tipos de medidas, como caracterização de antenas, medições de seção reta radar e compatibilidade eletromagnética. Nesses tipos de medidas, a antena e os demais equipamentos em teste devem ser avaliados sem interferências do ambiente ao redor. Nesse contexto, a câmara anecoica desempenha papel essencial, pois provê ambiente livre de ecos eletromagnéticos provenientes de reflexões internas e reduz os efeitos de sinais externos interferentes durante os ensaios. Diversos artigos abordam o projeto e a construção desse tipo de câmara (Chung; Chuah, 2003; 2004; Dina *et al.*, 2021) e sua importância para a área de micro-ondas e radiopropagação.

O IPqM possui, em seu Laboratório Integrado de Guerra Eletrônica, uma câmara com dimensões de 6×8×12 m (altura × largura × comprimento), construída nos anos 1990. Originalmente, foi projetada para operar de 7 a 40 GHz, com absorção média em torno de 55 dB nessa faixa de frequência. Na região reservada ao posicionamento do dispositivo em teste, há um cilindro de silêncio de 65 dB de atenuação. Logo acima dessa região, há também uma esfera de silêncio com atenuação de 70 dB, ambas válidas para a faixa de frequência prevista. A câmara existente no IPqM pode ser vista na Figura 1.

1.1. OBJETIVO

A Câmara do IPqM é de grande importância para o Instituto, pois constitui a principal instalação utilizada para os testes de calibração dos equipamentos MAGE Defensor desenvolvidos por militares e pesquisadores do Grupo de Guerra Eletrônica do IPqM. Dessa forma, este artigo teve como objetivo investigar o funcionamento da câmara para assegurar que ela opera conforme o esperado e pode continuar sendo utilizada com confiabilidade.

1.2. METODOLOGIA

Os testes exploratórios propostos estão relacionados à capacidade da câmara anecoica do IPqM de operar em proveito dos testes dos equipamentos MAGE Defensor, atualmente em desenvolvimento. Os testes foram idealizados para verificar

as condições de propagação das ondas eletromagnéticas na câmara e, para esse fim, foram propostos dois procedimentos:

- a) teste de blindagem eletromagnética; e
- b) teste de multicaminhos.

2. EXPERIMENTOS REALIZADOS

A estrutura de uma câmara anecoica consiste em uma caixa de metal com sistema de aterramento, fabricada de modo a funcionar como uma gaiola de Faraday. Sua construção deve fornecer proteção que impeça a interferência de sinais de fora para dentro e vice-versa (Méjean *et al.*, 2017), pois também é indesejável que a radiação gerada nos testes na câmara interfira no laboratório do lado externo.

Ao se projetar uma câmara, tem-se por objetivo obter um volume no qual qualquer energia refletida em seu interior seja muito menor do que as características do sinal de interesse, ou seja, deve garantir a absorção eletromagnética das ondas internas

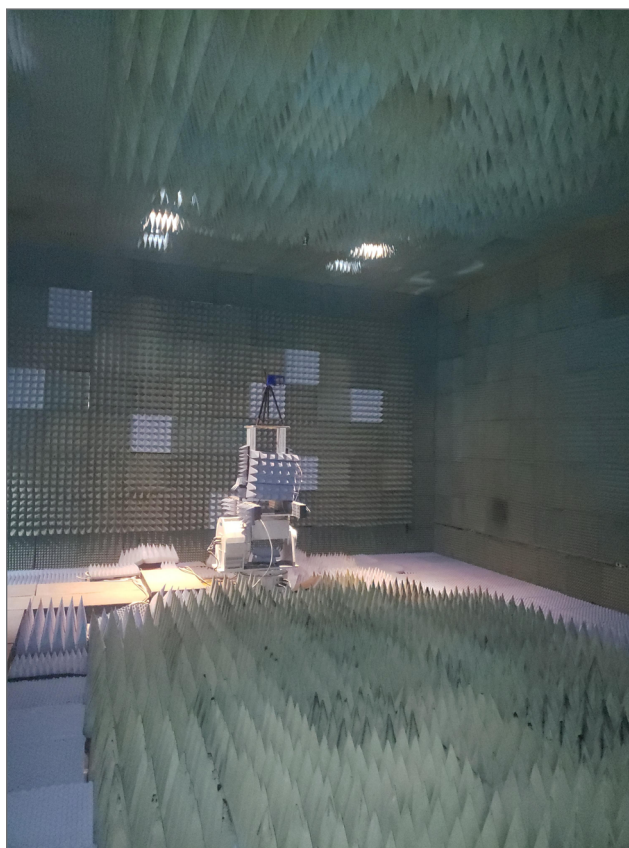


Figura 1. Câmara anecoica do Instituto de Pesquisas da Marinha.

refletidas, que não são de interesse. Esse volume é conhecido como zona de silêncio. Para obter essa característica, um aspecto fundamental do projeto é a utilização de material absorvedor de radiação eletromagnética que assegure que a energia refletida tenha efeito desprezível nos dados medidos (Rodríguez, 2016).

Esses absorvedores geralmente são estruturas piramidais de espumas (i.e., poliuretano), carregadas com partículas de material à base de carbono (grafite, negro de fumo etc.). O desempenho de absorção depende do tamanho das pirâmides e da concentração das partículas do material (Mustapha *et al.*, 2015). O excelente desempenho das pirâmides deve-se, principalmente, às múltiplas reflexões que ocorrem em suas faces; a cada reflexão, parte da onda é absorvida (Rodríguez, 2016). Essa absorção ocorre porque a onda eletromagnética percorre o interior do material, e sua energia se transforma em energia térmica, que se dissipa no ar circundante (Rodríguez, 2016).

2.1. TESTE DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

O teste de blindagem foi proposto visando a detectar a presença de sinais interferentes provenientes do ambiente externo à câmara anecoica, com o intuito de comparar o nível de sinal nos dois ambientes. Tal verificação constou de medidas no ambiente externo e interno à câmara, variando a faixa de frequência de 0,5 a 18 GHz, onde esta faixa foi segmentada para melhorar a relação sinal-ruído do equipamento.

O arranjo experimental utilizou, como receptor, o analisador de micro-ondas portátil Field Fox modelo N9951A, da Keysight, e duas antenas distintas, conforme a faixa de frequência, apresentadas na Tabela 1. Durante as medidas no interior da câmara, a porta permaneceu fechada e a antena receptora varreu toda a sua extensão.

2.2. TESTE DE MULTICAMINHO

O efeito de multicaminho, ou multipercurso, é o fenômeno em que o sinal chega ao receptor por diferentes trajetórias

Tabela 1. Antenas e faixas utilizadas no primeiro teste.

	Log-Periódica (5 a 1000 MHz)	Corneta (1 a 18 GHz)
Faixas de frequência	5 a 500 MHz	1 a 5 GHz
	500 a 1000 MHz	5 a 10 GHz
	-	10 a 15 GHz
	-	15 a 18 GHz

devido à reflexão do sinal transmitido em objetos existentes, como as paredes da câmara. Com base nisso, o segundo teste foi implementado visando a criar condições de propagação dos sinais de radiofrequência (RF) no interior da câmara, onde ocorre o efeito de multicaminho, para avaliar se as espumas existentes conseguem atenuar os sinais refletidos.

A verificação foi conduzida por meio do uso do analisador de rede vetorial (VNA) de duas portas, modelo N5232A, da Keysight, com cada uma de suas portas conectada a uma antena corneta que opera de 1 a 18 GHz, utilizando cabos iguais. A distância entre as antenas foi de 9,2 m, medida com telêmetro a laser; o arranjo pode ser observado na Figura 2.

As medidas foram realizadas pelo equipamento para obter os valores dos parâmetros S_{11} e S_{21} . O parâmetro S_{11} é obtido da relação entre o sinal transmitido pela antena do canal 1 e o sinal refletido de volta para essa mesma antena. Por sua vez, o parâmetro S_{21} é obtido da relação entre o sinal transmitido pela antena do canal 1 e o que chega à antena do canal 2.

Com o intuito de comparar o sinal que incide diretamente com aqueles que incidem por caminhos indiretos, as medições foram realizadas utilizando as funções de análise no domínio do tempo do VNA. Cabe ressaltar que o sinal que incide diretamente na antena receptora terá maior amplitude

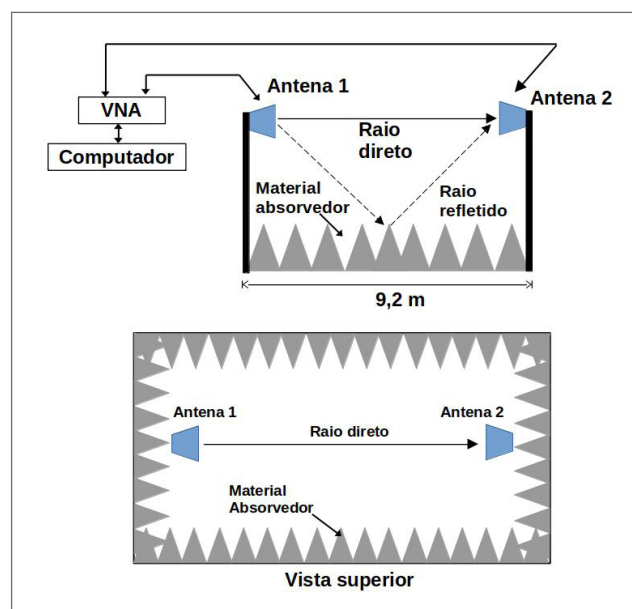


Figura 2. Vista lateral e superior do arranjo para verificação da influência do efeito de multicaminho nas medidas com análise temporal.

e menor tempo de propagação, uma vez que percorre o trajeto mais curto.

Inicialmente, foram realizadas medições do ambiente conforme o arranjo apresentado na Figura 2. Em um segundo momento, foi utilizada uma placa metálica de dimensões 50×40 cm, posicionada em três locais distintos dentro da câmara. Esse procedimento permitiu intensificar os sinais refletidos nessa região para verificar a existência de multicaminhos, uma vez que impede a absorção do sinal pelas espumas. O diagrama esquemático dos testes pode ser visto na Figura 3.

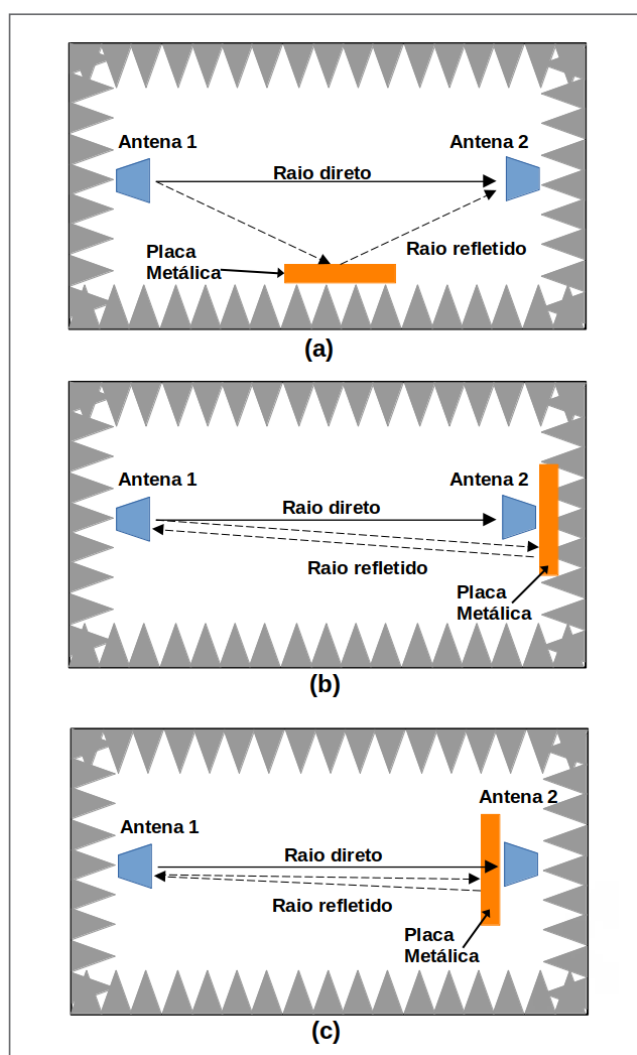


Figura 3. Esquemático da vista superior da câmara durante os testes de multicaminho: a) placa metálica posicionada na parede lateral da câmara anecoica; b) placa metálica atrás da antena 2; e c) placa metálica na frente da antena.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. TESTE DE BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA

Os resultados obtidos das medições de blindagem eletromagnética realizadas com a antena log-periódica são apresentados nas Figuras 4 e 5. Ao observar as curvas, nota-se a ocorrência de frequências ativas no ambiente externo, principalmente em torno de 700 MHz. Nas medições dentro da câmara anecoica, esses sinais não foram identificados, permanecendo o nível de ruído abaixo de -80 dBm.

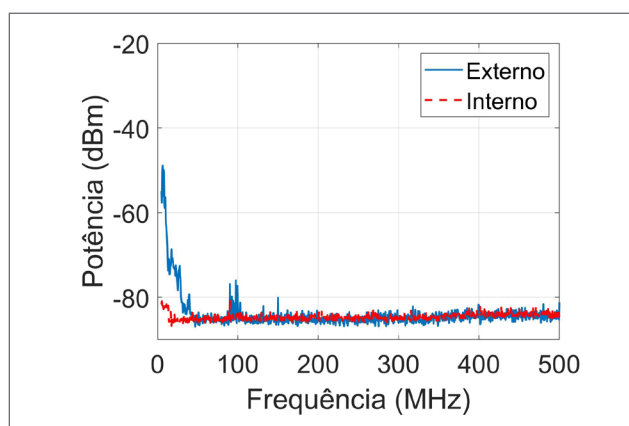


Figura 4. Medidas realizadas comparando ambiente externo e interno, utilizando a antena log-periódica na frequência de 5 a 500 MHz.

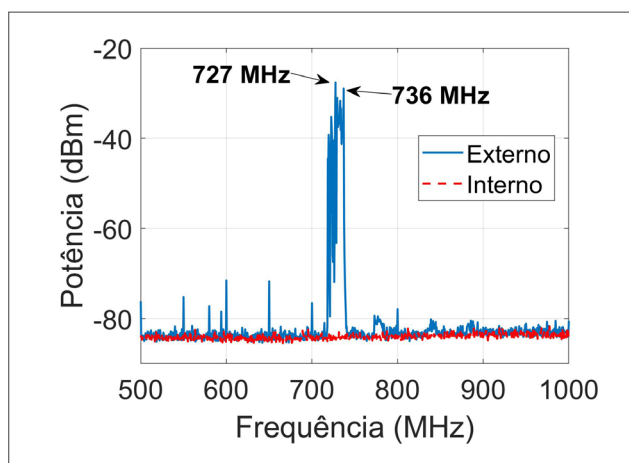


Figura 5. Medidas realizadas comparando ambiente externo e interno, utilizando a antena log-periódica na frequência de 500 a 1000 MHz.

As medidas realizadas com o arranjo formado pelo analisador de rede Field Fox e a antena corneta são apresentadas nas Figuras 6-9. A Figura 6 mostra a ocorrência, no ambiente externo, de frequências ativas em torno de 1,7 GHz, 1,9 GHz e 2,4 GHz, faixas utilizadas para sinais 3G e Wi-Fi. No ambiente interno da câmara, observa-se que o sinal permanece no nível de ruído em torno de -80 dBm do equipamento. Nos resultados apresentados nas Figuras 7-9, não há sinais com potência relevante acima de -75 dBm. As medidas mostram que há sinais presentes no ambiente

externo à câmara que poderiam causar interferências nas medidas internas; contudo, a câmara anecoica conseguiu isolar esses sinais. Os resultados comprovam que a câmara anecoica permanece eletromagneticamente blindada contra sinais de RF externos.

3.2. TESTE DE MULTICAMINHO

Os resultados dos testes de multicaminho foram agrupados de acordo com a presença e a posição da placa metálica refletora.

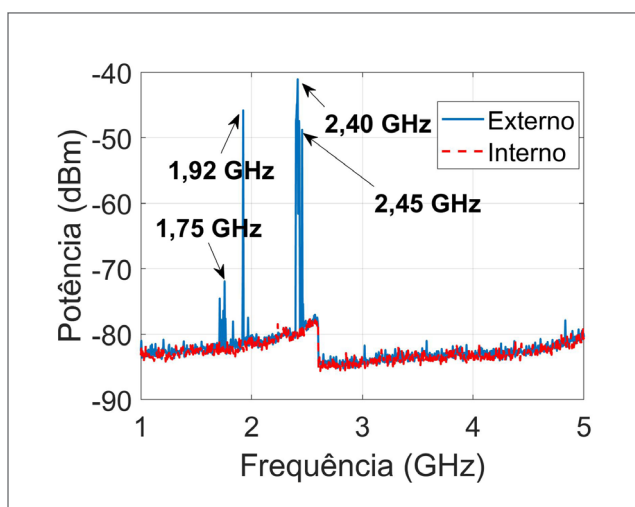


Figura 6. Medidas realizadas comparando ambiente externo e interno, utilizando a antena corneta na frequência de 1 a 5 GHz.

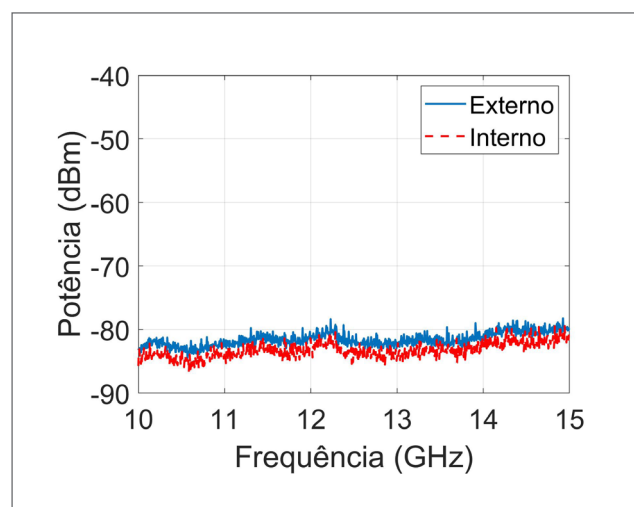


Figura 8. Medidas realizadas comparando ambiente externo e interno utilizando a antena corneta na frequência de 10 a 15 GHz.

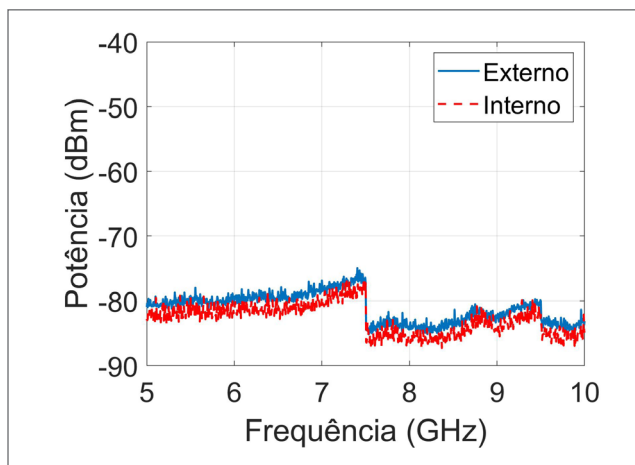


Figura 7. Medidas realizadas comparando ambiente externo e interno utilizando a antena corneta na frequência de 5 a 10 GHz.

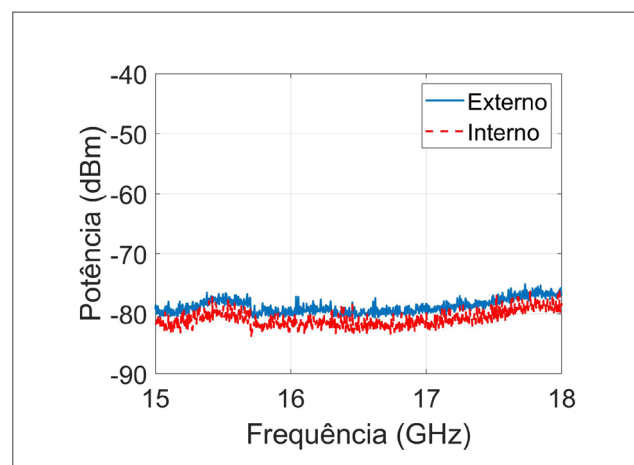


Figura 9. Medidas realizadas comparando ambiente externo e interno, utilizando a antena corneta na frequência de 15 a 18 GHz.

3.2.1. Sem placa refletora

O valor medido do parâmetro S_{21} sem a placa refletora pode ser observado na Figura 10. A Figura 10 revela que na vizinhança de 9,2 m ocorre o maior valor do parâmetro S_{21} , em torno de -44,8 dB. Esse sinal e sua posição coincidem com a distância entre as antenas, caracterizando-o como sinal direto. Desconsiderando essa vizinhança, não há detecção relevante de sinais antes ou depois do sinal de caminho direto. Cabe ressaltar que essa medição inclui os valores de ganho de sinal de RF na faixa de 1 a 18 GHz, somados no intervalo de tempo observado.

Após a observação do comportamento da câmara anecoica à luz do parâmetro S_{21} , procedeu-se à medição do parâmetro S_{11} . Os valores medidos podem ser observados na Figura 11. Nessa figura, observa-se que não há outro sinal refletido no período analisado além daquele proveniente da conexão do cabo coaxial da porta 1 do VNA com a antena corneta.

Em um segundo momento, a banda de frequência observada passou a ser de 1 a 6 GHz, visando a verificar o comportamento da câmara anecoica em uma faixa de frequência menor. Repetiu-se o procedimento anterior de medição, sendo o valor de S_{21} apresentado na Figura 12.

Os valores medidos confirmam que não há detecção de sinais antes ou depois do sinal de caminho direto. Com essa faixa de frequência, a precisão da medida em distância diminuiu, e o valor de S_{21} teve leve melhora devido à ausência de componentes espectrais mais elevadas. Como o valor de S_{21}

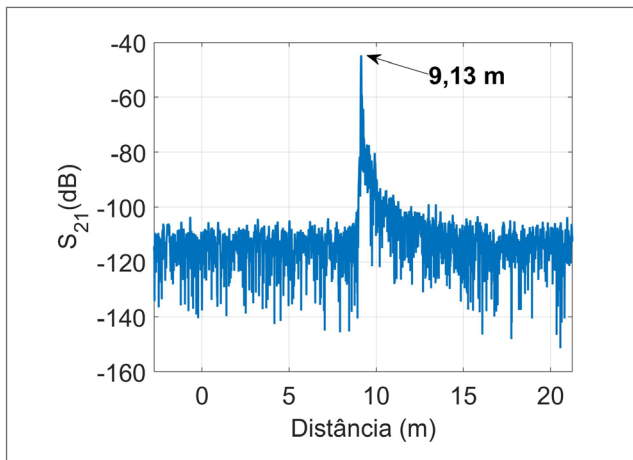


Figura 10. Medida do parâmetro S_{21} no domínio do tempo sem refletores na câmara anecoica na faixa de 1 a 18 GHz. O zoom permite observar a distância em torno de 9,2 m entre antenas.

é o somatório dos valores medidos no intervalo de frequência determinado, essa diferença ocorre porque as contribuições desfavoráveis das frequências mais altas foram desconsideradas ao se reduzir a faixa de frequência.

3.2.2. Placa refletora na parede lateral

Os valores do parâmetro S_{21} medidos para essa condição, na faixa de 1 a 18 GHz, podem ser verificados na Figura 13.

Observa-se que a detecção de sinal indireto ocorre após o sinal de caminho direto. Vale destacar que o tempo de propagação dessa medida é apresentado em nanossegundos,

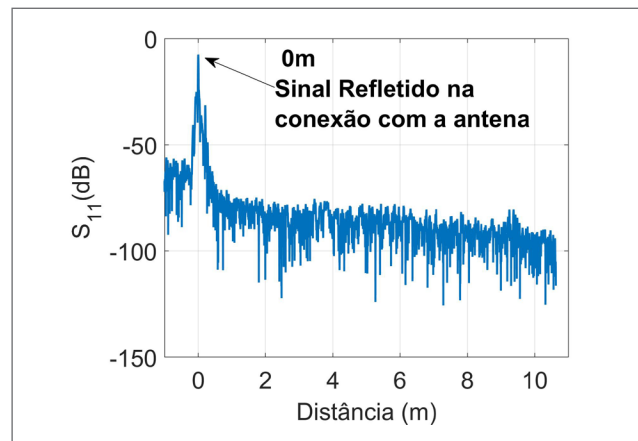


Figura 11. Medida do parâmetro S_{11} no domínio do tempo sem refletores na câmara anecoica na faixa de 1 a 18 GHz. O pico de sinal refletido ocorre na conexão da antena com o cabo de RF.

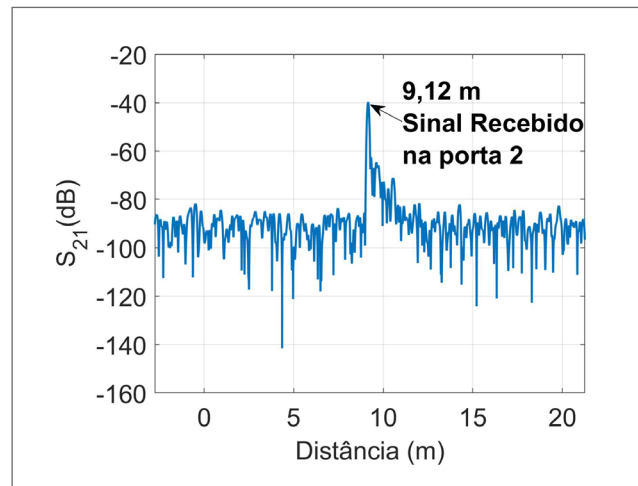


Figura 12. Medida do parâmetro S_{21} no domínio do tempo sem refletores na câmara anecoica na faixa de 1 a 6 GHz. A distância está em torno de 9,12 m entre antenas.

convertido em distância. A distância e o ganho estão coerentes com o esperado. O resultado obtido com a presença da placa indica que há sinais provenientes de raios indiretos; no entanto, na condição normal de utilização sem a placa refletora, esses sinais são atenuados pelo material absorvedor presente nas paredes da câmara, e chegam à antena receptora no nível de ruído. A presença desse sinal só pôde ser notada ao se utilizar a placa de metal para garantir a reflexão. Ao se alterar a faixa de frequência para 1 a 6 GHz, não foi observada a presença de sinal indireto nas medições.

3.2.3. Placa refletora na frente e atrás da antena 2

O resultado medido do S_{11} com a placa metálica posicionada à frente da antena 2, na faixa de 1 a 18 GHz, pode ser conferido na Figura 14.

Os resultados indicam que há sinal refletido aproximadamente à distância de 8,97 m, referente ao refletor.

O teste com a placa posicionada atrás da antena 2 foi realizado na faixa de 1 a 6 GHz, e o resultado da medida pode ser conferido na Figura 15.

Novamente percebe-se que há sinal refletido na origem da medida, referente ao cabo e à antena 1, e há outro sinal à distância de 9,55 m, referente ao refletor posicionado na parede atrás da antena 2. Assim como no caso da placa posicionada na lateral da câmara, o sinal do raio indireto só pode ser visualizado ao se utilizar a placa metálica refletora, corroborando a conclusão de que a câmara anecoica está funcionando adequadamente.

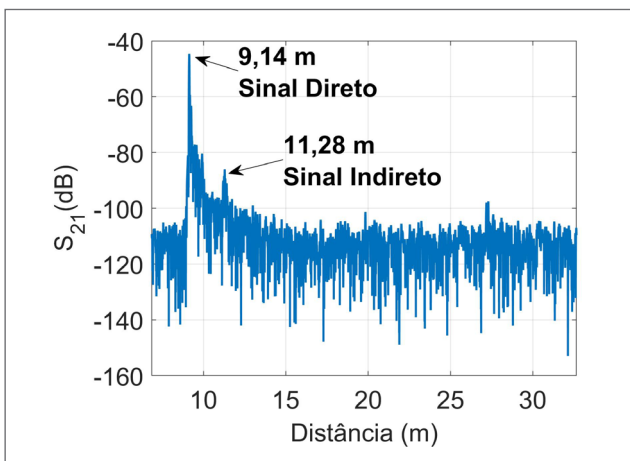


Figura 13. Medida do parâmetro S_{21} no domínio do tempo com refletor na região central da parede lateral da câmara anecoica na faixa de 1 a 18 GHz.

4. CONCLUSÃO

A câmara anecoica é um ambiente de grande importância para a área do eletromagnetismo, pois permite a reprodução de condições ideais para a realização de medidas, uma vez que consegue blindar e atenuar reflexões de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, é fundamental o funcionamento adequado da câmara do IPqM para a calibração correta dos equipamentos MAGE Defensor desenvolvidos no Instituto. Os testes apresentados neste artigo visaram a avaliar o funcionamento da câmara, a fim de assegurar a confiabilidade dos equipamentos avaliados em seu interior.

Ao analisar os resultados obtidos quanto à blindagem eletromagnética conduzida, tanto no ambiente externo quanto no interno, constata-se que a câmara se mostrou eficiente,

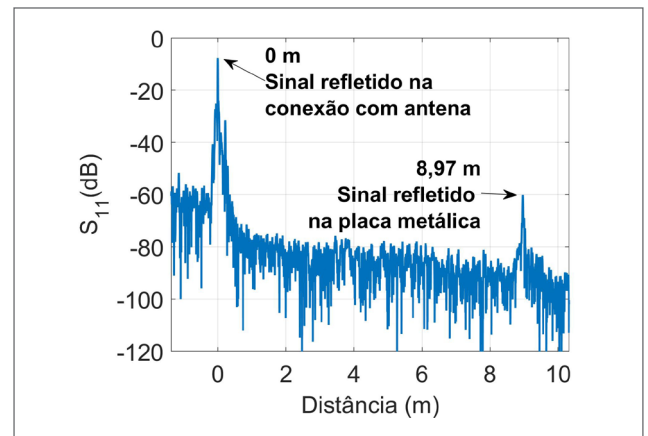


Figura 14. Medida do parâmetro S_{11} no domínio do tempo, com refletor na frente da antena 2, na faixa de 1 a 18 GHz.

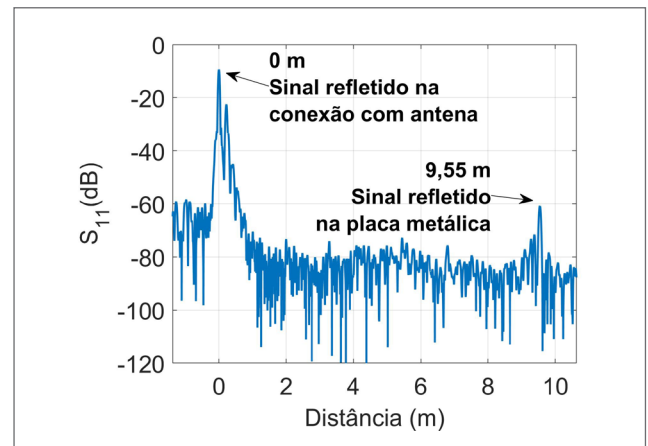


Figura 15. Medida do parâmetro S_{11} no domínio do tempo, com refletor atrás da antena 2, na faixa de 1 a 6 GHz.

uma vez que os sinais observados apresentaram nível de ruído baixo, conforme esperado.

Adicionalmente, os testes de multicaminho revelaram resultados condizentes com o esperado para uma câmara anecoica em bom estado, pois não evidenciaram sinais além do raio direto transmitido. Os sinais provenientes de reflexões internas só ficaram evidentes com o uso de refletores metálicos no interior da câmara, para criar o efeito de multicaminho. Esses sinais exibiram valores cerca de 40 dB abaixo do sinal direto, de modo que sua contribuição foi desprezível.

O efeito de propagação por multicaminho não foi observado, nem mesmo na faixa de frequências de 1 a 6 GHz, que originalmente não foi contemplada na faixa principal prevista no projeto da câmara e que, portanto, apresentaria desempenho levemente degradado. Dessa forma, pode-se inferir que a câmara anecoica do IPqM opera de forma aceitável, sem problemas de interferência ou reflexões que possam prejudicar as medidas realizadas em seu interior, e está apta à calibração dos sistemas MAGE Defensor em toda a sua faixa de frequências de operação.

REFERÊNCIAS

CHUNG, B. K.; CHUAH, H. T. Modeling of RF absorber for application in the design of anechoic chamber. *Progress in Electromagnetics Research*, v. 43, p. 273–285, 2003. <https://doi.org/10.1163/156939304322749661>

CHUNG, B. K.; CHUAH, H. T. Design and construction of a multipurpose wideband anechoic chamber. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 45, n. 6, p. 41–47, 2004. <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1282178>

DINA, L.-A.; VOICU, V.; NICOLAE, P.-M.; NICOLEANU, P.-A. Estimating the shielding efficiency of an anechoic chamber. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE), 12., 2021, Bucareste. *Proceedings [...]*. Piscataway: IEEE, 2021. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425284>

HOLLOWAY, C. L.; DELYSER, R. R.; GERMAN, R. F.; MCKENNA, P.; KANDA, M. Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic

and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 39, n. 1, p. 33–47, 1997. <https://doi.org/10.1109/15.554693>

MÉJEAN, C.; POMETCU, L.; BENZERGA, R.; SHARAIHA, A.; PAVENTHIVET, C. L.; BODARD, M.; POULIGUEN, P. Electromagnetic absorber composite made of carbon fibers loaded epoxy foam for anechoic chamber application. *Materials Science and Engineering: B*, v. 220, p. 59–65, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.03.009>

MUSTAPHA, H.; ISMAIL, K. H.; DAIM, T. J.; JAMIL, S. F. A review of shielding performance for anechoic chamber. *Applied Mechanics and Materials*, v. 793, p. 600–604, 2015. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.793.600>

RODRIGUEZ, V. Basic Rules for Indoor Anechoic Chamber Design [Measurements Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 58, n. 6, p. 82–93, 2016. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609821>