

UFMG - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PPGEE - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

Análise Experimental do Ensaio Veicular de Imunidade a Campos Eletromagnéticos Radiados em Câmara Semi-Anecóica de Pequeno Porte

Leonardo Alvarenga Lopes Santos

Texto submetido à Banca Examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito necessário para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: *Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino*

Belo Horizonte, 26 de Outubro de 2007.

Resumo

Há poucos anos atrás, os veículos automotores eram munidos essencialmente de sistemas mecânicos que realizavam todo tipo funções de controle. Nas últimas décadas, o desenvolvimento da tecnologia da informação, dos sistemas eletro-eletrônicos de comando, controle e servomecanismos, dotaram os veículos de uma enormidade de funções que refletiram em alta de performance, redução na emissões de poluentes, autonomia e conforto. Este avanço tecnológico, trouxe como consequência um grande aumento na ocupação do espectro eletromagnético emitido por veículos.

Para as aplicações automotivas, a compatibilidade eletromagnética (EMC - *electromagnetic compatibility*) pode ser definida como a ciência que busca ordenar a ocupação do espectro eletromagnético, de maneira a garantir o funcionamento dos veículos face à grande e crescente utilização de sistemas eletrônicos em nossa civilização.

Atualmente, a premissa elementar adotada para garantir a compatibilidade eletromagnética de um sistema ou equipamento é a verificação dos máximos níveis de emissões eletromagnéticas gerados pelo próprio equipamento (e por todos os equipamentos elétricos que coexistam nesse mesmo ambiente eletromagnético) e o mínimo nível de imunidade ou susceptibilidade a distúrbios eletromagnéticos.

Assim, quando existe uma margem entre emissões e imunidade eletromagnéticas, teoricamente, existirá um limite numérico que garanta a compatibilidade eletromagnética entre os equipamentos e sistemas instalados em um dado ambiente.

A FIAT Automóveis S/A, em parceria com universidades brasileiras, institutos técnicos internacionais e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) implantou um projeto para a criação de expertise nacional e potencializar sua estrutura laboratorial.

O projeto FIAT-CNPq 550525-2003/3 intitulado “Correlação de Mediadas de Campos Eletromagnéticos Irrradiados em Câmara Semi-anecóica de Grande e de Dimensões Reduzidas”, propõe a realização da prova de imunidade a campos eletromagnéticos em veículos em um ambiente eletromagnético de dimensões inferiores às dimensões prescritas em normas internacionalmente adotadas por empresas na área automobilística.

Será apresentado nesse trabalho, um conjunto de experimentos realizados em três ambientes eletromagnéticos distintos (câmara semi-aneecóica de pequeno porte, câmara semi-aneecóica de grande porte e OATS - Open Area Test Site) que foram executados como parte indispensável do projeto de pesquisa mencionado.

Na configuração dos experimentos, pretende-se demonstrar o desenvolvimento da capacidade de organização metodológica na construção do conhecimento a partir de experimentação empírica, com bases científicas, bem como, levantar dados para a verificação da confiabilidade de solução de problemas de campos eletromagnéticos fornecido pela ferramenta computacional HFSS “Hight Frequency Structure Simulator”, contribuindo assim para a futura validação computacional de sistemas eletrônicos veiculares.

Através da análise dos dados coletados nos experimentos, esperamos contribuir para a conclusão da exequibilidade da prova de imunidade a campos eletromagnéticos em sistemas eletrônicos montados em veículos em câmara semi-aneecóica de pequeno porte.

Espera-se que esses resultados, somados ás contribuições dos demais membros da equipe, possam gerar uma contribuição a curto prazo, para a industria automobilística local, no desenvolvimento e validação experimental de projetos.

Abstract

A few years ago, the self-driven vehicles were essentially provided with mechanical systems, used to perform many type of control functions.

In the last decades, the development of the technology of the information, the electro-electronic systems of command, control and servomechanisms endowed the vehicles with a huge amount of functions that reflected in a increase in performance, reduction in the emissions of pollutant, autonomy and comfort. As a consequence of that technological progress, there was a great increase in the occupation of the electromagnetic spectrum emitted by vehicles.

The electromagnetic compatibility is the science that looks for to organize the occupation of the electromagnetic spectrum, in a way to guarantee the operation of the vehicles facing the large and growing use of electronic systems in our civilization.

Nowadays, the elementary concept used to guarantee the electromagnetic compatibility of a system or equipment is the verification of the maxima levels of electromagnetic emissions generated by the own equipment, and all the electric equipments that coexist in that same environment, and the minimum immunity or susceptibility level to electromagnetic disturbances.

Thus, when there is a margin between emission and immunity levels, it will exist at least theoretically a numerical limit that guarantees the electromagnetic compatibility between the equipments and systems installed in a common environment.

FIAT Automóveis S/A company, in conjunction with Brazilian universities, international technical institutes and the National Council of Scientific and Technological Development (CNPq), implanted a research project for the creation of national expertise and improvement of its laboratorial facilities on electromagnetic compatibility issues.

The project FIAT-CNPq 550525-2003/3 entitled “Correlation of Electromagnetic Fields Measurements Irradiated in Semi-anechoic Chambers of Full and Reduced Dimensions”, proposes the accomplishment of electromagnetic fields immunity tests of vehicles using a reduced size semi-anechoic chamber.

In this work, it will be presented, a set of experiments performed in three different electromagnetic atmospheres (semi-anechoic chamber of small load, semi-anechoic chamber of great load and OATS - (Open Area Test Site) that were carried out as an indispensable part of the research project just mentioned.

The goal here is to demonstrate the capacity of scientific and methodological organization to construct knowledge starting from empirical experimentation, as well as to supply data for the verification of the reliability of the solution of electromagnetic fields problems modeled by the computational tool HFSS “High Frequency Structure Simulator”, and also contributing to the virtual validation of the research project.

From the analysis of the data collected in the experiments, we hope to contribute towards the possibility to perform electromagnetic fields immunity tests of on-board electronic systems, using a semi-anechoic chamber of small load.

It is expected that those results, added to the contributions of the other members of the team, can foment a technological product for immediate use in the local automobile plant aiming the development and experimental and virtual validation of projects through the creation of a methodology of experimental tests that guarantee, respecting the effective international criteria, the quality of their products.

Agradecimentos

Ao meu Pai Celestial que nunca se calou as minhas preces...

Dedico também esse trabalho à toda minha família, pela base, carinho, compreensão nas horas de renúncia a minha presença junto a eles; de modo especial à Fabiana Bittencourt Alvarenga pelo seu imenso amor, compreensão e incentivo constantes. Aos meus pais e filhos pela confiança depositada.

Gostaria de agradecer ao professor José Osvaldo pela orientação, boa vontade, paciência, transmissão de conhecimentos, formação, sabedoria e amizade. Agradeço de maneira especial aos Professores Glássio Costa de Miranda e Wallace do Couto Boaventura pelo apoio, amizade, disponibilidade de tempo e recursos laboratoriais do Laboratório de Extra-Alta Tensão (LEAT).

Agradeço também ao amigo e colega de profissão, Marcus Mundim, pela belíssima amizade, companheirismo e caminhada, Daniel dos Reis Correa.

Agradeço de maneira especial aos bolsistas do projeto FIAT-CNPq Roginelle Pires, Raquel Glaucia, Cláudio Henrique, Marcos Costa e Lucas Chamon que, pela colaboração e ajuda, além do comprometimento e amizade, sem os quais não seria possível concluir este projeto.

Ao Eng. Gilmar Laignier pelo apoio, desafio e cobrança, que me forçaram a dar conta do mestrado e do emprego ao mesmo tempo. Ao Eng. Alexandre Abreu, pela confiança e ao colega e amigo Kenedy Marconi.

Nesta jornada que me trouxe até aqui, não posso me escusar de citar o nome de quatro criaturas que muito contribuíram e contribuem na constante formação de meu caráter, através de seu amor e exemplo: †Irmã Gertrudes, †Santo Antônio, †Mestre R. Irineu Serra e Dona Noemi Gontijo, meu eterno muito obrigado.

Menção à Virgem Maria:

Debaixo do vosso patrocínio, oh Mãe diletíssima, e invocando o mistério de vossa imaculada conceição, quero prosseguir meus estudos e trabalhos literários e protesto faze-lo principalmente afim de servir melhor a honra divina. Rogo-vos, pois, Mãe amantíssima, sede da sabedoria, que favoreçais benigna os meus trabalhos e eu, piedosamente, atribuo todo o bem advindo destes méritos inteiramente a vossa intercessão junto ao Pai. Amém.

Lista de Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AR	Amplifier Research
CSA	Câmara Semi-Anecóica
CISPR	Comitee International Special des Perturbations Radioelectriques
DUT	Device Under Test
ELASIS	Centro de Pesquisa do Grupo FIAT
EMC	Electromagnetic Compatibility - Compatibilidade Eletromagnética
EMI	Electromagnetic Interference - Interferência Eletromagnética
ISO	International Organization Standardizations
LACE	Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética da Fiat.
LEAT	Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG.
RFI	Radio Frequency Interference - Interferência em Radio Frequência
SAE	Society of Automotive Engineers

Lista de Figuras

1.1	Comparação Visual dos veículos Fiat 147 e Palio	2
1.2	Câmara Semi-anecóica: Elasis - FIAT Itália	3
1.3	Câmara Semi-anecóica: LACE - FIAT Brasil	4
1.4	Definição das Variáveis da Proposta de Pesquisa	5
2.1	Modelo Geral de problemas em EMI	11
2.2	<i>Diagrama de Controle do LACE FIAT</i>	15
2.3	<i>Antena ETS 3106</i>	17
2.4	<i>Aspectos Construtivos da CSA LACE</i>	18
2.5	<i>Volume Interno da CSA LACE</i>	18
2.6	<i>Definição dos pontos de medição nos experimentos</i>	20
2.7	<i>Definição dos pontos de medição nos experimentos</i>	20
2.8	<i>Posicionamento do Disco de Medição: Posição V</i>	21
2.9	<i>Posicionamento do Disco de Medição: Posição II</i>	21
2.10	<i>Calibragem do ‘Site’ LACE</i>	22
2.11	<i>Grandezas Monitoradas Sistemade Imunidade LACE</i>	23
2.12	<i>Estabilidade da Potência de saída do Amplificador</i>	25
2.13	<i>Erro de Medição para Variação da Posição de Instalação do Sensor de Campo</i>	26
2.14	<i>Saturação do Sensor de Campo</i>	27
2.15	<i>Controle da Potência de Saída: 1.Potência Direta; 2.Campo; 3.Potência Líquida; 4.Nível de VSWR</i>	28
2.16	<i>Projeto do Experimento #1</i>	30
2.17	<i>Experimento #1</i>	31
2.18	<i>Projeto do Experimento #2</i>	32
2.19	<i>Fotografia do Experimento #2</i>	33
2.20	<i>Detalhe dos Lóbulos Secundários a 1GHz e Diagramas de radiação 3D: Polarização Vertical</i>	34

2.21	<i>Campos Medidos nos Experimentos #1 e #2 a 0,5m da abertura da antena 3106</i>	35
2.22	<i>Campos Medidos nos Experimentos #1 e #2 a 1,0m da abertura da antena 3106</i>	36
2.23	<i>Campos Medidos nos Experimentos #1 e #2 a 1,5m da abertura da antena 3106</i>	37
2.24	<i>Comparação entre Campos Medidos a 1,0m nos Exp. #1 e #2</i>	38
2.25	<i>Comparação entre Campos Medidos a 1,5m nos Exp. #1 e #2</i>	39
2.26	<i>Provável posição dos absorvedores de campo em relação ao disco de medição</i>	39
2.27	<i>Projeto do Experimento #3</i>	40
2.28	<i>Campos Medidos nos Experimento #3 a 0,5m , 1,0m , 1,4m; $\pm 0,05m$: Agrupados por distância entre antena e disco de medição</i>	41
2.29	<i>Campos Medidos nos Experimento #3 a 0,5m, 1,0m e 1,45 m: Separados por Pontos de medição de I a V</i>	42
2.30	<i>Campos Medidos nos Experimentos #2 e #3 a 0,5m</i>	43
2.31	<i>Campos Medidos nos Experimentos #2 e #3 a 1,0m</i>	44
2.32	<i>Campos Medidos nos Experimentos #2 e #3 a 1,45m</i>	45
2.33	<i>Projeto Experimento #4</i>	47
2.34	<i>Bloco de absorvedores avulso: Experimento #4</i>	48
2.35	<i>Posicionamento do Disco Experimento #4</i>	48
2.36	<i>Fotografia da Montagem Exp.#4</i>	49
2.37	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-I, Polarização Horizontal</i>	50
2.38	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-II, Polarização Horizontal</i>	51
2.39	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-III, Polarização Horizontal</i>	52
2.40	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-IV, Polarização Horizontal</i>	53
2.41	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-V, Polarização Horizontal</i>	54
2.42	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-I, Polarização Vertical</i>	55
2.43	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-II, Polarização Vertical</i>	56
2.44	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-III, Polarização Vertical</i>	57
2.45	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-IV, Polarização Vertical</i>	58
2.46	<i>Exp.#4 : Linha de Medição P-V, Polarização Vertical</i>	59
2.47	<i>Exp.#4: Linha de Medição P-V, SEM abs. Pol.H</i>	60
2.48	<i>Exp.#4: Linha de Medição P-V, COM abs. Pol. H</i>	60
2.49	<i>Exp.#4: Linha de Medição P-V, SEM abs. Pol. V</i>	61
2.50	<i>Exp.#4: Linha de Medição P-V, COM abs. Pol. V</i>	61
2.51	<i>Exp.#4: Diferença Medida COM X SEM abs., Pol. H</i>	62

2.52	<i>Exp.#4: Diferença Medida COM X SEM abs., Pol. V</i>	62
3.1	<i>Diferença entre Medições OATS e CSA</i>	66
3.2	<i>Erro de Normalização</i>	67
3.3	<i>Veiculo Simplificado</i>	68
3.4	<i>Veiculo Simpl. Cortado</i>	68
3.5	<i>Mapeamento Campo Veiculo Simplificado: Esquema de Montagem</i>	69
3.6	<i>Mapeamento Campo Veiculo Simplificado: Fotografia da Montagem</i>	69
3.7	<i>Medição veículo Simplificado: OATS LEAT</i>	69
3.8	<i>Medição veículo Simplificado: CSA LACE</i>	69
3.9	<i>Calibragem: Potência x Campo Medido</i>	70
3.10	<i>Pt. Med. A6: Pol. H</i>	71
3.11	<i>Pt. Med. A6: Pol. V</i>	71
3.12	<i>Pt. Med. A8: Pol. H</i>	72
3.13	<i>Pt. Med. A8: Pol. V</i>	72
3.14	<i>Pt. Med. A10: Pol. H</i>	72
3.15	<i>Pt. Med. A10: Pol. V</i>	72
3.16	<i>Pt. Med. B6: Pol. H</i>	73
3.17	<i>Pt. Med. B6: Pol. V</i>	73
3.18	<i>Pt. Med. B8: Pol. H</i>	73
3.19	<i>Pt. Med. B8: Pol. V</i>	73
3.20	<i>Pt. Med. B10: Pol. H</i>	73
3.21	<i>Pt. Med. B10: Pol. V</i>	73
3.22	<i>OATS: Medições a 1,5m Veiculo Real</i>	75
3.23	<i>OATS: Medições a 3,0m Veiculo Real</i>	75
3.24	<i>Erros Inseridos pelo 'Site': Pol. H e Pol. V</i>	76
3.25	<i>Pontos de Medição Interno Veículo</i>	77
3.26	<i>Medições Veiculo: Pto. A1 Pol. H</i>	78
3.27	<i>Medições Veiculo: Pto. A1 Pol. V</i>	78
3.28	<i>Medições Veiculo: Pto. A3 Pol. H</i>	78
3.29	<i>Medições Veiculo: Pto. A3 Pol. V</i>	78
3.30	<i>Medições Veiculo: Pto. A5 Pol. H</i>	78
3.31	<i>Medições Veiculo: Pto. A5 Pol. V</i>	78
3.32	<i>Pto. Med. Caixa de Ar: Pol.H</i>	79
3.33	<i>Pto. Med. Caixa de Ar: Pol.V</i>	79
3.34	<i>Pto. Med. Porta Luvas: Pol.H</i>	79

3.35	<i>Pto. Med. Porta Luvas: Pol.V</i>	79
3.36	<i>Pto. Med. Radio: Pol.H</i>	79
3.37	<i>Pto. Med. Radio: Pol.V</i>	79
3.38	<i>Pto. Med. Quadro: Pol.H</i>	80
3.39	<i>Pto. Med. Quadro: Pol.V</i>	80
3.40	<i>Veiculo Inteiro</i>	82
3.41	<i>Veiculo Cortado</i>	82
3.42	<i>Pto. A1 Pol.H</i>	83
3.43	<i>Pto. A1 Pol.V</i>	83
3.44	<i>Pto. A2 Pol.H</i>	83
3.45	<i>Pto. A2 Pol.V</i>	83
3.46	<i>Pto. A3 Pol.H</i>	83
3.47	<i>Pto. A3 Pol.V</i>	83
3.48	<i>Pto. A4 Pol.H</i>	84
3.49	<i>Pto. A4 Pol.V</i>	84
3.50	<i>Pto. A5 Pol.H</i>	84
3.51	<i>Pto. A5 Pol.V</i>	84
3.52	<i>Pto. CxAr Pol.H</i>	84
3.53	<i>Pto. CxAr Pol.V</i>	84
3.54	<i>Pto. PL Pol.H</i>	85
3.55	<i>Pto. PL Pol.V</i>	85
3.56	<i>Pto. QS Pol.H</i>	85
3.57	<i>Pto. QS Pol.V</i>	85
3.58	<i>Pto. Rad Pol.H</i>	85
3.59	<i>Pto. Rad Pol.V</i>	85
3.60	<i>Veículo Cortado: Escopo Técnico do Projeto CNPq 550525-2003/3</i>	87
3.61	<i>Pto. Rad Pol.H</i>	88
3.62	<i>Pto. Rad Pol.H</i>	88
3.63	<i>Pto. A1 Pol.H</i>	90
3.64	<i>Pto. A1 Pol.V</i>	90
3.65	<i>Pto. A3 Pol.H</i>	90
3.66	<i>Pto. A3 Pol.V</i>	90
3.67	<i>Pto. A5 Pol.H</i>	90
3.68	<i>Pto. A5 Pol.V</i>	90
3.69	<i>Pto. CxAr Pol.H</i>	91
3.70	<i>Pto. CxAr Pol.V</i>	91
3.71	<i>Pto. PL Pol.H</i>	91

3.72	<i>Pto. PL Pol.V</i>	91
3.73	<i>Pto. QS Pol.H</i>	91
3.74	<i>Pto. QS Pol.V</i>	91
3.75	<i>Pto. Rad Pol.H</i>	92
3.76	<i>Pto. Rad Pol.V</i>	92
A.1	Tipos de Modulações do Sinal de Prova	106
A.2	<i>Exemplo de compartimento blindado com absorvedor: Vista Lateral</i>	112
A.3	<i>Exemplo de compartimento blindado com absorvedor: 1.Compartimento blindado com absorvedores; 2.Material absorvedor de radiofrequência (RF); 3.Dinamômetro do veículo sobre plataforma giratória; 4.Antena; 5.Sala do amplificador; 6.Sala de controle.</i>	112
A.4	<i>Exemplo de sistema de linha de transmissão (TLS) de placas paralelas: 1.Compartimento blindado (permitido absorvedores); 2.Placa ou conjunto de fios condutivos; 3.Suportes não-metálicos; 4.Piso do compartimento blindado; 5.Linha de alimentação da fonte do sinal (cabo coaxial); 6.Cabo coaxial; 7.Carga; 8.Fios condutivos; 9.Conexão de alimentação da fonte do sinal; 10.Plataforma giratória (não requerida para este ensaio).</i>	114
A.5	<i>Exemplo de configuração de ensaio: α Ângulo de inclinação da antena; 1.Compartimento blindado com absorvedores; 2.Gerador de sinais de radiofrequência (RF); 3.Amplificador de potência; 4.Acoplador bidirecional; 5.Potenciômetro; 6.Passagem coaxial; 7.Dispositivo de geração de campo eletromagnético; 8.Ponto de referência do veículo;</i>	116
A.6	<i>Exemplo de ponto de referência do veículo: Veículos de passeio e veículos comerciais leves: 1. Ponto de referência do veículo; 2. Eixo dianteiro.</i>	120
A.7	<i>Exemplo de ponto de referência do veículo em Ônibus e veículos comerciais: 1.Interseção do pára-brisa e o capô.</i>	121
A.8	<i>Exemplo de configuração de ensaio: Calibragem da posição de uma ponta de prova única (veículo com altura de teto ≤ 3 m): α Ângulo de inclinação da antena; 1. Ponto de referência; 2. Ponta de prova para medição do campo eletromagnético; 3. Injeção de corrente nos cabos.</i>	122

A.9 *Exemplo de configuração de ensaio: Calibragem da posição de quatro pontas de prova(veículo com altura de teto ≤ 3 m): α Ângulo de inclinação da antena; 1. Linha de referência; 2. Posições das pontas de prova; 123*

Lista de Tabelas

2.1	<i>Atenuação da CSA LACE</i>	19
A.1	<i>ISO 11451: Varredura de Frequência</i>	107
A.2	<i>ISO11451-2: Nível de Severidade</i>	109

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação:	
	Projeto FIAT-CNPq 550525-2003/3	3
1.2	Objetivos e Justificativa	5
1.3	Organização do texto	6
1.4	Participação na Elaboração de Normas da Área de EMC: ABNT	8
1.4.1	Artigos Publicado decorrente do Trabalho	9
2	Introdução ao Teste de Imunidade a Campos Radiados em Veículos	10
2.1	Medições de Imunidade a Campos Eletromagnéticos Radiados em Câmaras Semi-Anecóicas	12
2.2	Câmaras Semi-Anecóicas: CSA	14
2.3	Sinopse dos Equipamentos Utilizados nas Provas	15
2.4	Caracterização de Campos Gerados na CSA do LACE	19
2.4.1	Metodologia de Testes	19
2.4.2	Calibragem do Campo Gerado em CSA	22
2.4.3	Grandezas Monitoradas	23
2.4.4	Reprodutibilidade de Resultados	25
2.4.5	Erro de Variação de Posicionamento do Sensor de Campo	26
2.4.6	Saturação do Sensor de Campo	27
2.4.7	Potência Líquida <i>versus</i> Campo Medido	28
2.5	Experimento # 1	30
2.6	Experimento # 2	32
2.7	Experimento # 3	40
2.8	Experimento # 4	47
2.8.1	Experimento # 4: Resultados	49

3	Experimentos Realizados em Veículos	64
3.1	Avaliação do Site Tipo OATS	65
3.2	Veículos Simplificados	68
3.2.1	Resultados	70
3.2.2	Conclusões	74
3.3	Medições em Veículos Industrializados	75
3.3.1	Resultados	77
3.3.2	Conclusões	81
3.4	Definição do Fator de Similaridade: Veículo Inteiro e Cortado	82
3.4.1	Resultados	82
3.4.2	Conclusões	86
3.5	Mini “Site”	87
3.5.1	Metodologia de Prova	88
3.5.2	Resultados	89
3.5.3	Conclusões	92
4	Conclusões e propostas de continuidade	93
A	Norma NBR ISO11451:	
	Partes 1 e 2	99
A.0.4	Termos e definições	100
A.0.5	Propósito geral e uso prático	103
A.0.6	Condições gerais do ensaio	104
A.0.7	Modulação:	105
A.0.8	Definição dos níveis de severidade e elementos de funcionalidade	106
A.0.9	Métodos de ensaio	110
A.1	Local de ensaio	111
A.2	Aparelhagem de ensaio	113
A.3	Estímulo e monitoramento do veículo	113
A.4	Configuração de ensaio: “Site”	115
A.4.1	Posicionamento do veículo	115
A.4.2	Restrições da antena	115
A.4.3	Restrições do sistema de linha de transmissão (TLS)	115
A.5	Ensaio	116
A.5.1	Condições do ensaio	116
A.5.2	Plano de ensaio	117
A.5.3	Método de ensaio	118

A.5.4	Calibragem do campo eletromagnético	118
A.5.5	Procedimento de ensaio	122
A.5.6	Relatório de ensaio	123

*Comece fazendo o que é necessário,
depois o que é possível,
e de repente você estará fazendo o impossível.*

Francisco de Assis

Banca Examinadora

DOUTOR JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO - UFMG
DOUTOR GLÁSSIO COSTA DE MIRANDA - UFMG
DOUTOR TARCÍSIO A. S. OLIVEIRA - CEFET-MG
MESTRE MARCUS VINÍCIUS MUNDIM - FIAT

Capítulo 1

Introdução

Nas últimas três décadas houve um crescimento acentuado na produção e modernização de veículos nacionais, sobretudo após a implantação abertura do mercado nacional às importações, implantada na gestão do ex-presidente Fernando Collor de Mello no ano de 1990 a 1992. A partir deste período, verificou-se um acelerado processo de modernização da frota circulante de veículos no país.

Uma característica marcante nesse processo de modernização da frota nacional, refere-se à utilização de sistemas eletrônicos para a realização de funções de controle no veículo. O exemplo clássico deste salto tecnológico é o emprego do gerenciamento da injeção de combustível do motor a combustão interna ser realizado por bicos injetores controlados por uma unidade central eletrônica (ECU) ao invés do antigo carburador.

Os problemas relativos à EMC em veículos automotivos têm crescido rapidamente em complexidade e diversidade devido ao grande aumento da eletrônica embarcada. A Fig.1.1 mostra detalhes de acabamento interno de dois veículos: Fiat 147 (1978) e Fiat Palio (2004), que ilustra as mudanças de conceitos construtivos de veículos com a substituição de dispositivos elétricos e mecânicos por eletrônicos.

A importância e gravidade da questão da EMC em veículos automotivos é evidenciada também por ações de entidades não governamentais, como por exemplo a Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA) que criou em 2003 uma comissão exclusiva para tratar de assuntos dessa natureza: A Comissão de EMC da AEA.



Figura 1.1: Comparação Visual dos veículos Fiat 147 e Palio

Um exemplo onde os problemas de EMC podem envolver riscos à saúde humana é o uso de veículos como unidades intensivas móveis onde as EMI causadas pelo veículo nos equipamentos médicos podem influir no monitoramento de um paciente. (Outros exemplos, além de um breve histórico da evolução da EMC em veículos podem ser encontrados em [San02]).

1.1 Motivação:

Projeto FIAT-CNPq 550525-2003/3

Tendo em vista os recentes problemas causados pela aplicação de componentes eletrônicos em veículos e conseqüentemente de EMC, várias pesquisas têm sido feitas no intuito de mitigar os problemas de EMC [CIS05] [C6301]; [C6396]; [J1175] bem como definir ensaios capazes de avaliar o comportamento do veículo de maneira a garantir que ele possa ser considerado imune aos problemas de compatibilidade.[Adr07];

O projeto CNPq 550525-2003/3, “Correlação entre Medições de Campos eletromagnéticos Gerados em Câmara Semi-Anecóica de Grande Porte e de Dimensões Reduzidas” proposto pela FIAT Automóveis, foi elaborado com o objetivo de capacitar profissionais na área de EMC em veículos, além potencializar seu Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética (LACE) no desenvolvimento de provas veiculares.



Figura 1.2: Câmara Semi-aneecóica: Elasis - FIAT Itália

O objetivo da proposta de metodologia de testes de suscetibilidade irradiada, é criar uma montagem, de dimensões reduzidas - câmara semi-aneecóica de pequeno porte - capaz de submeter os componentes elétricos e eletrônicos montados nos veículos, às mesmas solicitações eletromagnéticas que sofreriam se estivessem sendo avaliados em uma montagem internacionalmente definida - câmara semi-aneecóica de grande porte, padrão ISO, eliminando assim a necessidade de envio de veículos ao exterior para serem testados.



Figura 1.3: Câmara Semi-aneecóica: LACE - FIAT Brasil

As Fig.1.2 e Fig.1.3 são fotografias dos ambientes eletromagnéticos, câmara semi-aneecóica de grande porte e câmara semi-aneecóica de pequeno porte respectivamente.

Para a solução do problema proposto no escopo do projeto, houve a formação de uma equipe interinstitucional dividida em: Equipe de medições e Equipe de cálculo de campo.

A equipe de medições, constituída por professores e alunos da UFMG, CEFET-MG e UNB, responsável pela realização e análise de testes experimentais. A equipe de Cálculo de Campo, constituída por professores e alunos da UFMG, PUC-Minas e CEFET-MG responsável pela análise computacional dos experimentos.

O grande desafio desse projeto foi o cumprimento das etapas citadas em um prazo de 2 anos.

1.2 Objetivos e Justificativa

O Projeto CNPq 550525-2003/3 tem o objetivo de investigar a viabilidade da proposta de se realizar a prova de imunidade a campos eletromagnéticos radiados em uma câmara semi-anecóica [CIS05] de dimensões inferiores às recomendadas pela norma NBR-ISO 11451-2, da ABNT. As variáveis que definem a proposta de pesquisa estão esquematizadas na Fig.1.4.

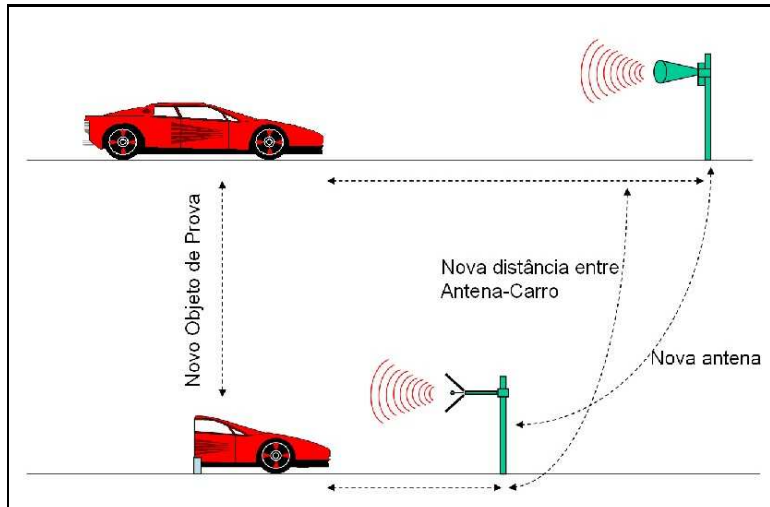


Figura 1.4: Definição das Variáveis da Proposta de Pesquisa

- Aproximação do veículo à fonte de campo (antena corneta);
- Capacidade de Geração de Campos do Sistema;
- Corte do Veículo.

O primeiro problema de aproximação entre veículo e antena, foi abordado pelos alunos Ricardo Luiz Adriano em sua tese [Adr07]-análise computacional, e Roginele S. S. Pires - medições, que defendeu o exame de qualificação da tese [Pir05], ambos inscritos no Departamento de Pesquisa e Pós Graduação da UFMG. O aluno Javier A. G. Alfaro da UNB, analisou a capacidade do sistema disponível no LACE.

O problema da distribuição de campos eletromagnéticos no interior de veículos, inteiro e seccionado foi abordado de maneira preliminar, pelas análises computacionais dos alunos Gustavo L. Campos e Cristiano M. Pereira da PUC-Minas.

O objetivo desse trabalho de mestrado foi o desenvolvimento de uma metodologia de testes, que a partir da realização de um conjunto de experimentos, fornecesse informações capazes de verificar a viabilidade da realização da prova de imunidade a campos radiados em veículos em uma câmara semi-aneecóica de dimensões reduzidas, se comparada às dimensões adotadas por empresas do setor.

Visto sua característica fundamentalmente experimental, esta dissertação, pode ser classificada como exploratória, pelos seus fins e experimental pelos métodos.

Para atingir este objetivo, foi necessário um detido estudo nos equipamentos que constituem o sistema de estímulo e medição de campos em câmaras semi-aneecóica, além de uma revisão na literatura registrada em [Pir05].

1.3 Organização do texto

Essa dissertação está organizada em três conjuntos básicos de experimentos, sumarizados em dois capítulos: Caracterização de Campos Gerados na Câmara Semi-Anecóica do LACE-FIAT e Experimentos Realizados em Veículos.

Cada conjunto engloba uma série de experimentos, constituídos através de uma ordem crescente de complexidade que, por exclusão de variáveis, intentou-se individualizar a contribuição de cada uma das grandezas que definem a propagação de campos eletromagnéticos em ambiente semi-aneecóico.

O primeiro conjunto de experimentos tem como objetivo caracterizar o sistema de geração e medição de campos eletromagnéticos de alta frequência disponível [ISO01] ; [ISO95], bem como estabelecer uma comparação dos campos gerados por este sistema no ar e no interior de uma câmara semi-aneecóica

do LACE. Através dos dados desse conjunto de medições foi realizado uma quantificação da influência do plano de massa e das estruturas absorventes de campos eletromagnéticos característicos em câmara semi-anecóica do LACE.

O segundo conjunto de experimentos mostra uma comparação entre campos eletromagnéticos medidos no interior estruturas metálicas simplificadas (*carros Flintstones*), que apresentam seus volumes internos similares aos volumes de veículos inteiro e cortado com o objetivo de verificar os efeitos da aproximação do objeto espalhador à antena quanto a uniformidade de distribuição de campos em seu interior. Estes experimentos foram realizados em um ambiente eletromagnético tipo OATS, construído no interior do LEAT, conforme recomendações da norma CISPR-16.

Ainda nesse capítulo, é apresentado o último conjunto de experimentos nos fornece um mapeamento da distribuição de campos eletromagnéticos no interior e proximidade do painel de um veículo industrializado, realizado em OATS, em CSA de grande porte e o mesmo mapeamento, realizado em um veículo cortado, porém em uma CSA de pequeno porte.

O resultado desse conjunto de experimentos é uma comparação da distribuição de campos eletromagnéticos no interior e periferia do painel dos veículos, onde ficam situados as principais centrais eletrônicas do veículo.

Através do conjunto de medições realizadas, esperamos concluir a exequibilidade da prova de imunidade a campos eletromagnéticos em sistemas eletrônicos montados em veículos em câmara semi-anecóica de pequeno porte, suas limitações e a real contribuição para a indústria automobilística no desenvolvimento de metodologias de testes experimentais que garantam, respeitando os critérios internacionais vigentes, a qualidade de seus produtos.

É apresentado no apêndice desse trabalho um resumo da norma NBR-ISO11451 partes 1 e 2.

1.4 Participação na Elaboração de Normas da Área de EMC: ABNT

Inicialmente o projeto CNPq 550525-2003/3 previa como base a norma ISO11451 para definição dos procedimentos de medição da prova veicular de imunidade a campos irradiados. Nesse período (meados de 2003) houve a formação do Comitê de Compatibilidade Eletromagnética subordinado ao Comitê Técnico Automotivo (CB-5) da ABNT que teve como objetivo instituir as primeiras normas brasileiras sobre o assunto.

Após dois anos de trabalho, envolvendo representantes das principais empresas montadoras de veículos, representantes técnicos dos fabricantes de componentes eletrônicos brasileiros, representantes do comitê de eletrônica da AEA (Associação de Engenharia Automotiva do Brasil), foi aprovada e posteriormente publicada as primeiras normas automotivas de compatibilidade eletromagnética do Brasil, nomeadas NBR-ISO11451, coerentes com a família de normas ISO11451.

Como coordenador do comitê de EMC da ABNT, participei da elaboração das seguintes Trabalhos Técnicos, publicados até o momento:

- ABNT NBRISO 11451-1 [ABN06]: Projeto 05:106.02-009/1 Veículos rodoviários automotores - Métodos de ensaio de componentes para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita - Parte 1: Princípios gerais e terminologia.
- ABNT NBRISO 11451-2 [ABN05]: Projeto 05:106.02-009/2 Veículos rodoviários automotores - Métodos de ensaio de componentes para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita - Parte 2: Fontes de radiação fora do veículo.
- ABNT NBRISO 11451-3: Projeto 05:106.02-009/3 Veículos rodoviários automotores - Métodos de ensaio de componentes para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita - Parte 3: Simulação do transmissor embarcado(Ref. ISO 11451-3).
- ABNT NBRISO 11452-1 [ABN05]: Projeto 05:106.02-010/1 Veículos rodoviários automotores - Métodos de ensaio de componentes para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita - Parte 1: Princípios gerais e terminologia (Ref. ISO 11452-1)..

- ABNT NBRISO 11452-2: Projeto 05:106.02-010/2 (ISO 11452-2) - Veículos rodoviários automotores - Métodos de ensaio de componentes para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita - Parte 2: Compartimento blindado com absorvedores. (Ref. ISO 11452-2).

1.4.1 Artigos Publicado decorrente do Trabalho

- Santos, Leonardo Alvarenga Lopes; Souza, Gilmar Laignier de; Paulino, José Osvaldo S. Correlação de medidas de campos eletromagnéticos irradiados em câmara semi-anecóica de grande porte e de dimensões reduzidas. VIII Seminário sobre a Eletro-Eletrônica Aplicada à Mobilidade, AEA, junho de 2006.
- Santos, Leonardo Alvarenga Lopes; Paulino, José Osvaldo S.; Immunity Radiated in Vehicles: Analyzes of Evaluation of the Reduction of Set Up of Test. SAE Congress, 2007.
- Henrique, Cláudio H. G. S; Alípio, Rafael S.; Resende, Úrsula C.; Afonso, Marcio M.; Santos, Leonardo A. L. “Approximated Raising of the Curvature of a Double-Ridged Waveguide Horn Antenna in a Computational Model ”IMOC, 2007.

Capítulo 2

Introdução ao Teste de Imunidade a Campos Radiados em Veículos

A compatibilidade eletromagnética ou EMC pode ser descrita como uma linha da engenharia elétrica que trata da coexistência entre os equipamentos ou sistemas eletrônicos e o ambiente eletromagnético que os hospeda [Pau06]. Isto porque, ao funcionar, normalmente os dispositivos elétricos e eletrônicos produzem campos eletromagnéticos não intencionalmente, que podem afetar outros dispositivos instalados em um mesmo ambiente.

A compatibilidade eletromagnética está embasada em dois princípios elementares:

- Emissões: O equipamento ou sistema, durante seu funcionamento, não deve emitir sinais eletromagnéticos, cujo conteúdo espectral polua o ambiente eletromagnético circunvizinho com amplitudes superiores a limites bem definidos. Esta é uma tentativa de reduzir a presença de distúrbios interferentes em ambientes específicos, como indústrias, zonas urbanas, por exemplo.
- Imunidade ou Susceptibilidade: O equipamento ou sistema, deve funcionar corretamente quando se encontrar em um ambiente eletromagnético poluído com níveis de campos definidos.

A probabilidade de correto funcionamento de um sistema eletrônico é alta, assumindo-se que estes não emitam campos eletromagnéticos além dos especificados, e sejam imunes a campos especificados, desde que haja uma margem de segurança entre os limites de emissões e imunidade.

Um outro aspecto classificado como imunidade, mas que requer uma atenção especial é o fenômeno de descarga eletrostática ou ESD (*ElectroStatic Discharge*): O equipamento ou sistema deve funcionar corretamente quando for submetido a uma descarga eletrostática.

Portanto, um equipamento ou sistema é eletromagneticamente compatível se satisfaz a três critérios:

- não causa interferência em outros sistemas;
- não ser susceptível a interferências oriundas de outros sistemas;
- não degradar seu próprio funcionamento, por interferência eletromagnética emitidas por seus próprios componentes internos.

Os critérios de projeto de sistemas devem levar em conta não apenas a funcionalidade em si do dispositivo projetado mas também atender aos requisitos legais previstos em quase todas as nações para poder ser comercializado. Nada adiantaria projetar um sistema inovador se este não puder ser comercializado. As técnicas e métodos de projeto em compatibilidade eletromagnética se tornaram parte fundamental do projeto de sistemas eletrônicos.

A interação do sistema ou equipamento com o meio em que funciona está subordinada basicamente a produção, transmissão e recepção de energia eletromagnética [kF99]. Estes três aspectos definem a estrutura basilar de qualquer problema de EMC e pode ser esquematizado através da seguinte diagramação: Fonte (fonte não intencional de geração de energia eletromagnética), percurso de transmissão do sinal interferente e receptor ou vítima de interferência eletromagnética, como mostra a Fig.2.1.



Figura 2.1: Modelo Geral de problemas em EMI

Uma fonte de interferência (dita como emissor) emite um sinal eletromagnético que, mediante a um dispositivo de transferência ou um percurso de acoplamento, é transmitido a um receptor que o interpreta realizando um comportamento desejado ou invés disso, interpreta de maneira não prevista um distúrbio, obtendo um comportamento indesejado. Portanto, tem-se o fenômeno de interferência [Bal97] quando a energia recebida provoca um comportamento não desejado no receptor. A transferência de energia eletromagnética causa frequentemente fenômenos de acoplamentos não desejáveis, todavia, a energia eletromagnética emitida apenas causa interferência se for suficientemente elevada e ou seu conteúdo espectral for de tal de maneira constituído que, quando elaborado, resulte em um funcionamento anômalo no receptor.

A transmissão e recepção de energia eletromagnética não intencional não é necessariamente danosa: é o **comportamento indesejável do receptor** que estabelece a interferência. Assim, o modo em que a energia capacitada é elaborada pelo receptor que define o grau e riscos gerados por determinadas interferências, daí o conceito de susceptibilidade. Se um sistema ou equipamento apresentar susceptibilidade inferior ao nível de sinais presentes no ambiente em que trabalha, este equipamento não é compatível eletromagneticamente, mesmo que em outros ambientes funcione perfeitamente.

2.1 Medições de Imunidade a Campos Eletromagnéticos Radiados em Câmaras Semi-Anecóicas

Mesmo que se avalie separadamente em bancada, os sistemas eletrônicos veiculares podem apresentar uma peculiar baixa de imunidade o que, dada a geometria da carroceria do veículo, a incidência de campos pode resultar em uma solicitação eletromagnética amplificada através de reflexões, ressonância ou difração, de maneira a gerar campos eletromagnéticos que apresentem amplitudes elevadas.

Quando esses coincidentes em frequência e níveis específicos de sistemas, pode haver degradação em seus funcionamentos. A importância da realização da prova de imunidade a campos eletromagnéticos em veículos reside nesse fato.

Atualmente não temos registro de ferramentas computacionais que integrem de maneira satisfatória estas variáveis. Portanto, é necessário o dispêndio de meios físicos e experimentais para a avaliação da susceptibilidade eletromagnética de um sistema eletrônico veicular.

A partir dos aspectos descritos, identificamos como variáveis que estabelecem a susceptibilidade eletromagnética: a geometria da estrutura metálica veicular, a instalação do sistema eletrônico no veículo e a forma de processamento definida para aquele sistema avaliado.

Os campos eletromagnéticos podem se acoplar aos sistemas eletrônicos do veículo diretamente, nas trilhas das placas de circuitos impressos ou através do chicote de fios do veículo. O processo de acoplamento é altamente dependente da frequência de interesse. Abaixo de 20 MHz nem o "cabearamento" (*harness wire*) da carroceria nem os sistemas eletrônicos agem como antenas eficientes, porque eles são relativamente pequenos comparados com o comprimento de onda da interferência. Conseqüentemente, nenhum problema de suscetibilidade irradiada geralmente ocorre na frequência de transmissão da rede elétrica, em LW ou até mesmo MW, apesar dos campos irradiados serem intensos nestas faixas de frequência. Na faixa de 20 MHz a 200 MHz o *cabearamento* da carroceria age como uma antena razoavelmente eficiente, e correntes, em média, da ordem de 1 mA podem ser induzidas para cada volt/metro de intensidade de campo, sendo o acoplamento dependente dos efeitos de ressonância e de blindagem oferecidos pela carroceria do veículo. Acima de 200 MHz, as perdas elétricas do *cabearamento* automotivo tornam-se consideráveis, fazendo com que estes deixem de funcionar como antenas eficientes. Por outro lado, o acoplamento direto nas placas de circuito impresso dos sistemas eletrônicos pode acontecer, visto que suas dimensões são comparáveis a um quarto do comprimento de onda do sinal interferente. [Pir05] Como essa dissertação se baseia na análise e caracterização de campos eletromagnéticos presentes nos testes, o intervalo de frequência escolhido, abrangeu a faixa de 200 MHz a 1,0 GHz.

Considerou-se que, uma vez que haja correlação entre os ensaios, os sistemas seriam submetidos às mesmas solicitações eletromagnéticas que sofreriam se estivessem sendo avaliados em uma CSA tradicional (os principais sistemas eletrônicos presente nos veículos usualmente são instalados em sua parte dianteira) [Bal89].

2.2 Câmaras Semi-Anecóicas: CSA

Tais câmaras consistem de uma estrutura externa blindada, revestida em seu interior com algum tipo de material absorvente de ondas eletromagnéticas nas paredes e teto. As paredes metálicas blindam o equipamento sob teste de sinais de rádio provenientes de fontes externas e impedem que os sinais gerados nas câmaras (teste de imunidade) se propaguem para o exterior. Uma câmara é chamada anecóica se há absorvedores no piso, e semi-anecóica se o piso for um plano condutor. Testes de emissão e de imunidade caracterizam dois fenômenos diferentes, assim as câmaras para esses dois tipos de testes possuem diferentes requisitos que devem ser alcançados antes que possam ser utilizadas como um instrumento de ensaio. Para a prova de imunidade irradiada as normas européias de base EN 61000-4-3, ENV 50140, ENV 50204 e IEC801-3 definem os critérios para caracterização do ambiente eletromagnético, bem como os requisitos mínimos do sistema de estímulo. Internacionalmente o conjunto de normas da família ISO 11451 é definido, tanto na Europa, nos Estados Unidos, Japão e Brasil como a referência legal para testes de imunidade em veículos associado ao procedimento de proteção de receptores veiculares definido pela CISPR-25 [INT02].

Os produtos são testados quanto a imunidade, para assegurar seu perfeito funcionamento na presença de campos eletromagnéticos no meio ambiente.

Os níveis de campos eletromagnéticos previstos nas normas particulares das indústrias automotivas são, até 4 vezes superior ao nível mínimo de imunidade recomendado por organismos internacionais, como por exemplo nas resoluções da Comunidade Européia, como a CE-104-2004. Nesse sentido, a geração de campos eletromagnéticos de elevadas amplitudes tornariam a realização da prova proibitiva, visto o controle do nível de emissão de campos eletromagnéticos de cada nação. No Brasil, podemos citar a resolução da Agencia Nacional de Telecomunicações ANATEL resolução 305 de 2002, que limita a emissão de ondas eletromagnéticas geradas intencionalmente no território brasileiro, na faixa de frequência de 200 MHz a 1 GHz, valores máximos de ($150 \mu\text{V}/\text{m}$ a $500\mu\text{V}/\text{m}$) para a faixa de frequência de interesse.

Como as medidas de imunidade a campos radiados são referenciadas ao espaço livre, daí, a necessidade de realiza-las em câmaras anecóicas ou câmaras semi-anecóicas com absorvedores posicionados, pelo menos, em algumas partes do solo condutor.

2.3 Sinopse dos Equipamentos Utilizados nas Provas

O sistema de geração, controle e monitoramento do LACE, é constituído de equipamentos que atendem as determinações mínimas definidas pela NBR-ISO11451 capaz de gerar campos eletromagnéticos no intervalo de frequência de 200 MHz a 1GHz. A Fig. 2.2 observamos as características de controle do sistema.

O programa de controle do sistema EMS-K1, fornecido pela empresa Rohde e Schwarz, faz o monitoramento, sincronização e arquivamento de dados de cada um dos equipamentos através de uma rede de dados IEEE488 ou GPIB.

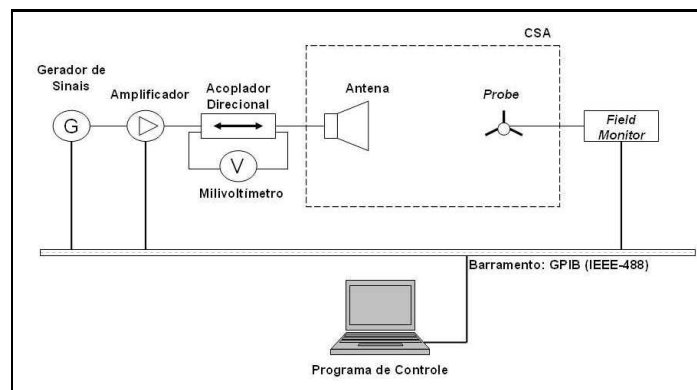


Figura 2.2: Diagrama de Controle do LACE FIAT

Gerador de Sinais: SML03 (R&S)

Equipamento capaz de gerar ondas senoidais e ondas complexas (Modulação AM, FM, FASE e RDS), na faixa de frequência que vai de 9kHz a 3.3GHz.

Amplificador de Sinais modelo 500W1000A (AR)

O modelo 500W1000A é um amplificador independente, ar refrigerado, operando numa ampla banda de radio frequência com a finalidade em aplicações em banda larga e um ganho elevado, típicos em testes de susceptibilidade RF, antenas e testes em componentes. Seus circuitos internos operam sobre alta energia com o propósito de diminuir distorção do sinal e melhorar a estabilidade. O 500W1000A, quando utilizado com um gerador realizando varredura em RF, proporcionará no mínimo 500W de energia, medido sob uma carga de 50Ω , na faixa de 80 a 1.000 MHz.

Milivoltímetro URV5(R&S)

O milivoltímetro *URV5* é um medidor de banda larga sensível a tensão elétrica e capaz de medir potência. Caracterizado por alta exatidão e, adequado para operação manual e uso em sistemas, possui dois canais de medição independentes, onde com as devidas pinças ou *probes* realiza variados tipos de medições com sinais de RF modulados ou não. Este aparelho possui interface IEC-bus sendo possível realizar o controle remoto do mesmo. Possui, também, várias funções capazes de aperfeiçoar as medições.

Acoplador Bi-direcionais DC-6180(AR)

O modelo DC6180 é um acoplador direcional dual que opera numa ampla faixa de frequência de 80 a 1000 MHz. O acoplador direcional quando inserido numa linha de transmissão permite uma monitoração do fluxo de energia RF, ou seja, energia incidente e refletida nesta linha, proporcionando o mínimo de perturbação no sinal da linha principal no processo de amostragem.

Antena ETS 3106

Para converter a potência disponível em campo eletromagnético foi utilizado uma antena fabricada pela empresa ETS Lingren [EL06], modelo 3106 (*Double-Ridged Waveguide Horn*). A antena 3106 apresenta duas características particularmente interessantes para provas de EMC: Ganho elevado[Lov76] (se comparado com outras tipologias de antena) e ampla faixa de frequência declara pelo fabricante, de 200 MHz até 2 GHz. Estas performance foi atin-gida pelo emprego de duas características construtivas: uso de uma base estrutural tipo corneta e aplicar em seu interior guias de onda [Bal88]. A Fig. 2.3 mostra uma fotografia da antena ETS 3106 [DI57].



Figura 2.3: Antena ETS 3106

Monitor e Sensor de Campos Isotrópicos(AR)

Monitor: O *Field Monitor-5004* é um sistema de monitoração de campo elétrico e magnético que realiza controle de dados, apresenta funções de alarme e exibe todas as medidas. Apresenta entrada para quatro pontas de provas isotrópicas (*Field Probe (FP)*). Além de exibir as leituras de quatro pontas de provas simultaneamente e algumas combinações, por exemplo, cinco pontas de provas de campo elétrico e duas de campo magnético ou apresentar leituras de cada eixo, da ponta de prova.

Ponta de Prova: O *FP-5000* é uma ponta de prova para medição de campo elétrico isotrópico (1 a 300 V/m) operando numa ampla banda de radio frequência (10kHz a 1GHz) utilizado em aplicações de testes em sistemas de interferência em radio frequência e compatibilidade eletromagnética (RFI e EMC) [Isb60]. Esta ponta de prova utiliza isolamento ótica a fim de minimizar perturbação de campos durante as medições. O FP-5000 mede campo nos três eixos (X, Y, e Z). Realiza um cálculo adicional com os valores lidos e envia o resultado para o receptor (*Field Monitor*) via cabo de fibra ótica. Os dados de cada eixo podem ser visualizados individualmente ou podem ser combinados.

Características da Câmara Semi-Anecóica Analisada

A câmara semi-anecóica do LACE é constituída por um volume blindado 6,0 x 5,0 x 3,1 metros. O acesso ao interior da câmara é feito por duas portas: Uma de dimensões 3,0 x 2,7 metros que é destinada a entrada de veículos e outra 1,0 x 2,3 metros, destinada ao acesso de técnicos do LACE. A Fig. 2.4 mostra aspectos construtivos e o volume útil 4980 x 2490 x 3890 milímetros cúbicos (volume deduzido dos absorvedores).

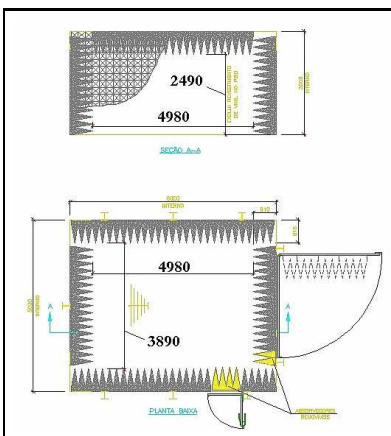


Figura 2.4: Aspectos Construtivos da CSA LACE

Uma idéia do espaço interno disponível pode ser visto na ilustração da Fig. 2.5.

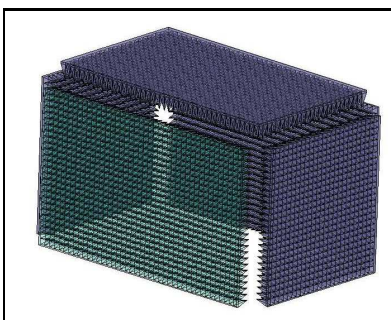


Figura 2.5: Volume Interno da CSA LACE

Suas características de blindagem encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1: *Atenuação da CSA LACE*

Frequência (Hz)	Campo	Atenuação (dB)
10 k	M - Magnético	56
200 k	M - Magnético	100
200 k	E - Elétrico	100
1M	E - Elétrico	100
18 M	E - Elétrico	100
100 M	E - Elétrico	100
400 M	P - Plano	100
1 G	P - Plano	100

2.4 Caracterização de Campos Gerados na CSA do LACE

Para a caracterização dos fenômenos eletromagnéticos que envolvem o teste de imunidade a campos irradiados, foi desenvolvido uma metodologia de testes que, a partir do sistema e equipamentos disponíveis citados no capítulo 2 desse texto, procurou extrair o máximo de informações quanto a geração, medição, uniformidade, decaimento e efeitos relevantes à propagação de campo eletromagnético em testes de EMC em veículos.

As medições foram limitadas ao intervalo de 200MHz a 1GHz, com passos lineares em todo o espectro de 5MHz. Cada medição fornece um conjunto de dados de 161 pontos (200MHz a 1GHz, com passo de 5MHz), sem modulação.

2.4.1 Metodologia de Testes

A metodologia consiste em definir no espaço, pontos fixos específicos para inserir o sensor de campo. Uma vez definidos os pontos de medição, os experimentos foram realizados. Com base na [ABN05], que estabelece um critério de verificação da uniformidade de campo através do procedimento de calibragem do ambiente e sistema (item 9.4.2.3) [ISO01] os pontos de referência foram definidos como mostra a Fig.2.6.

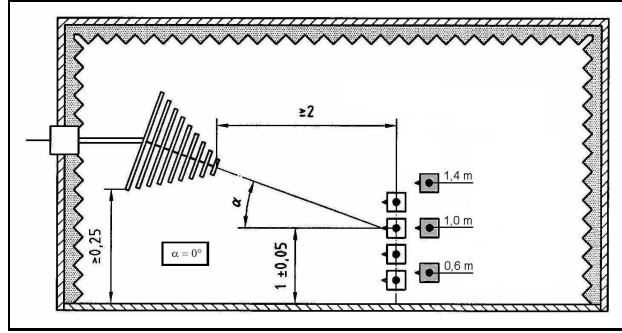


Figura 2.6: *Definição dos pontos de medição nos experimentos*

Para suportar e garantir o re-posicionamento dos sensores de campo após cada prova efetuada foi construído um suporte fino de madeira, circular com diâmetro de 0,8 m, que denominamos *disco de medição*. Foram marcadas cinco posições, distribuídas nesse disco conforme Fig.2.7 e em cada uma delas aplicada um adesivo para fixação e remoção do sensor. Embora a norma NBR-ISO11451-2 defina como critério de uniformidade de campo apenas pontos situados na mesma reta imaginária do ponto de referência, a um metro do plano terra, para obter informações sob a aproximação do veículo, consideramos relevante medir o campo em pontos laterais.

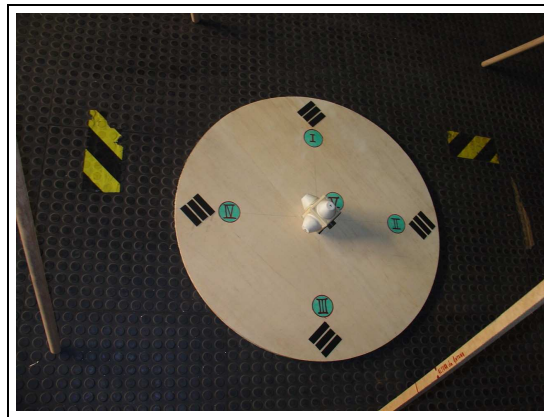


Figura 2.7: *Definição dos pontos de medição nos experimentos*

Para execução dos experimentos foram tomadas precauções para garantir a reprodutibilidade dos resultados:

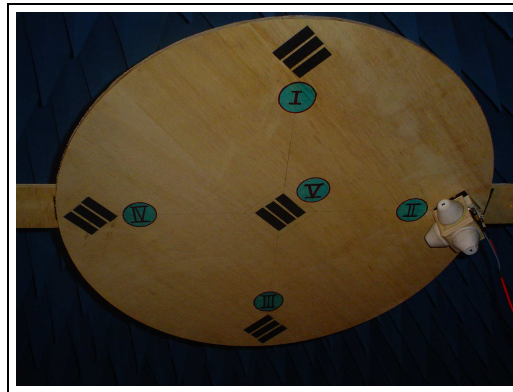
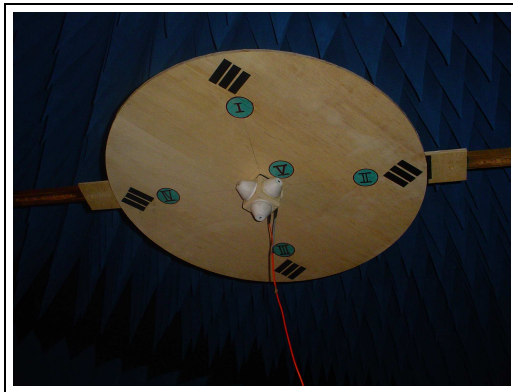


Figura 2.8: *Posicionamento do Disco de Medição: Posição V*

Figura 2.9: *Posicionamento do Disco de Medição: Posição II*

- Posicionamento do Sensor de Campo: Embora o sensor seja de natureza isotrópica, pode ocorrer indução de campo predominantemente em uma dada direção o que aumenta o erro absoluto do sistema, uma vez que o sensor fornece uma média dos valores medidos na três direções. Desta maneira, em cada uma das posições do disco, o sensor foi orientado com um eixo de medição paralelo à direção de propagação da antena, e as outras duas direções em que ocorrem medições radialmente em cada uma das posições (de I a IV) como mostra a Fig.2.9, onde o sensor está situado na posição II. No ponto de medição do centro do disco, o sensor foi posicionado como na posição V, como mostra a Fig.2.8;
- Em todos os experimentos realizados, não havia nenhum objeto condutor a menos de 2,0 m a frente da antena (excetuando-se naturalmente os objetos espalhadores, anteparos e veículos), conforme recomendado pelo fabricante do sensor;
- Antes da realização de cada bateria de medições, os equipamentos foram previamente alimentados por um período mínimo de 30 minutos, para que ambos atingissem o equilíbrio térmico e os testes fossem executados sem inserções de novas variáveis.

2.4.2 Calibragem do Campo Gerado em CSA

O primeiro procedimento realizado foi a calibração do *site* (sistema de medição, monitoramento e características do ambiente eletromagnético) LACE. Como é definido pela NBR-ISO11451-2, foi utilizado o sistema de calibragem de quatro sensores, uma vez que intenta-se utilizar a câmara semi-aneecóica para testes em veículos particulares e estes apresentam altura inferiores a três metros.

A norma define ainda como padrão de uniformidade, que em pelo menos dois pontos de medição na linha de referência de calibragem, um a 0,50 m em cada lado do ponto de referência, a variação do campo medido deve estar dentro da faixa de 0 a 6 dB em pelo menos 80% dos pontos de frequência de ensaio.

A Fig. 2.10 mostra o resultado do procedimento de calibragem, com a antena instalada em polarização vertical e horizontal.

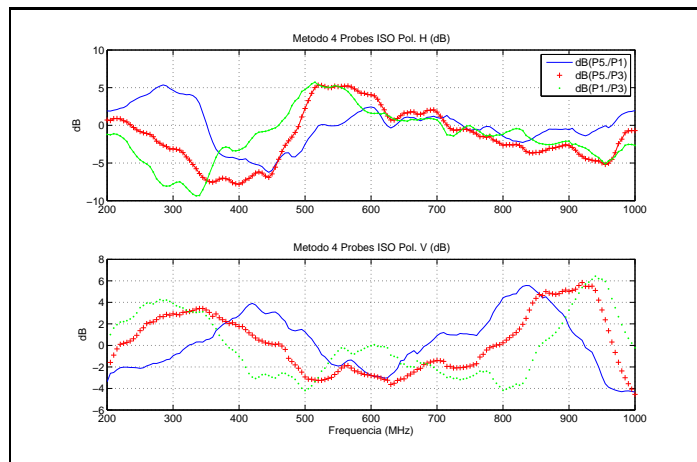


Figura 2.10: *Calibragem do 'Site' LACE*

Observamos que na faixa de frequência de 200 MHz a 1GHz, temos 80,5% dos pontos de ensaio na polarização horizontal, estão dentro da faixa de variação recomendada pela norma NBR-ISO11451-2 de 6 dB requeridos. Apenas 9% dos pontos de calibragem estão fora da recomendação de uniformidade de campo para polarização vertical.

2.4.3 Grandezas Monitoradas

O programa de controle do sistema de imunidade do LACE, oferece como possibilidade de referenciar o controle do sistema a uma única variável, embora processe a medida de maneira que outras grandezas sejam monitoradas. Por exemplo, caso o teste seja realizado com um nível de campo eletromagnético constante em um dado ponto de medição, no espectro de frequência determinado, define-se como *Imunit Parameter* o valor de campo em V/m (o sistema foi programado *default* apenas para este parâmetro). Caso deseje-se fazer um teste com potência constante em toda faixa, define-se como *Imunit Parameter* o valor de potência líquida do sistema.

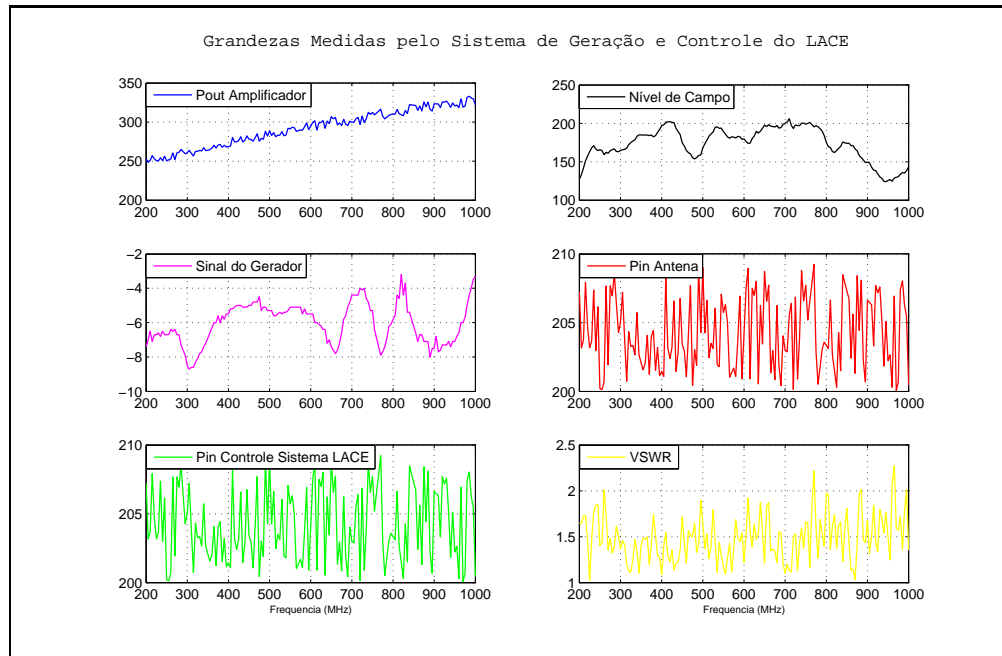


Figura 2.11: *Grandezas Monitoradas Sistemade Imunidade LACE*

Durante a realização das simulações, observou-se que o programa HFSS [Ans06] apresentava apenas como valor de excitação de antenas a potência em W. Os testes de EMC são realizados normalmente com campo constante. Isso é possível variando, para cada frequência de excitação, o nível do sinal de saída do gerador e em algumas situações o ganho do amplificador.

Foi necessário a re-programação do sistema para que, em todos os experimentos houvesse como parâmetro de monitoramento a potência líquida (potência direta - potência reversa). Foi necessário o controle do sinal de saída do gerador e o ganho do amplificador, uma vez que esse, não é um dispositivo elétrico linear.

Além do campo medido, potência direta, potência reversa, nível do sinal de saída do gerador o sistema monitora o parâmetro VSWR (*Voltage Stationary Wave Rate*), taxa de tensão de onda estacionária.

A Fig. 2.11 apresenta todas as grandezas lidas pelo sistema, tendo como *Imunit Parameter* o valor de potência líquida fornecida pelo sistema em W.

2.4.4 Reprodutibilidade de Resultados

Para verificar a reprodutibilidade dos resultados foram realizados experimentos onde apenas uma variável do teste foi monitorada. Por exemplo, para verificar a estabilidade da potência de saída do amplificador, foram realizadas 15 medições, com as mesmas configurações do sistema, porém em dias diferentes. Caso houvesse alguma variação expressiva do sistema de excitação, poderíamos percebê-las pela análise comparativa das curvas de medição da potência de saída do amplificador. A Fig.2.12 mostra este ensaio onde foi monitorada a potência direta de saída do amplificador em 15 experimentos.

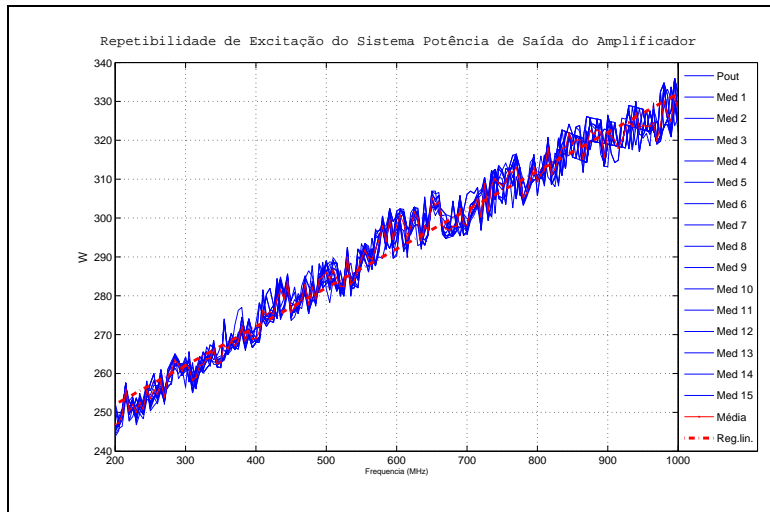


Figura 2.12: *Estabilidade da Potência de saída do Amplificador*

2.4.5 Erro de Variação de Posicionamento do Sensor de Campo

A distribuição de campo em um ambiente aberto, como mostrado na avaliação da uniformidade de campo, oferece relativamente uma baixa variação nos valores circunvizinhos a um dado ponto de referência. Quando imaginamos, no entanto, a distribuição de campo em um ambiente blindado, com aberturas (no caso repartições no interior de veículos) a mínima variação na posição de instalação do sensor pode resultar em erros consideráveis. Foi proposto um teste, relativamente simples, para quantificar o erro devido a pequenas variações no posicionamento do sensor de campo.

Foram realizados quatro medições consecutivas de campo, em que se variou, com passo de 90° a instalação do sensor de campo, na mesma posição de medição. O disco de medição foi instalado 1,0m acima da antena e essa com a abertura mirada para o teto da câmara semi-anecóica. Os resultados mostram erros de até 8% no valor dos campos eletromagnético medidos como mostrado na Fig.2.13.

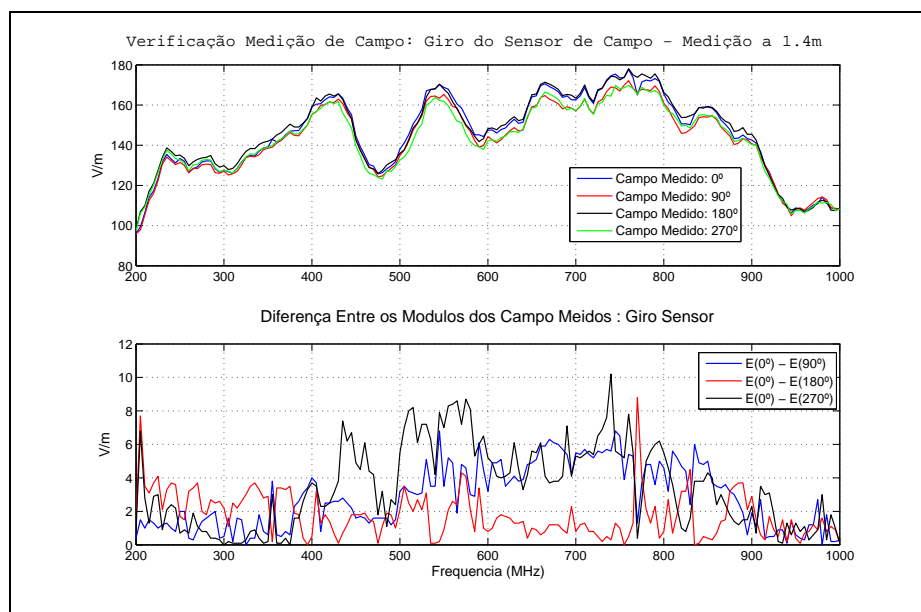


Figura 2.13: *Erro de Medição para Variação da Posição de Instalação do Sensor de Campo*

2.4.6 Saturação do Sensor de Campo

Para garantir um relação sinal/ruído ótima, a potência líquida de excitação do sistema foi conservada em 200 W para todos os experimentos realizados em câmara semi-anecóica. Com a introdução de anteparos na direção de propagação de campo, observou-se que o campo elétrico total medido pelo sensor de campo superava o valor de tensão máxima de 300 V/m. Porém, em muitos experimentos o campo medido foi superior a 300 V/m e não houve saturação do sensor. Como o sensor percebe e quantifica o campo em sua vizinhança através de diodos *Schottky*, é possível superar o valor de campo prescrito (300 V/m) desde que a exposição seja realizada em um tempo inferior a 2s. A Fig. 2.14 mostra o erro de indicação de campo quando o sensor é saturado.

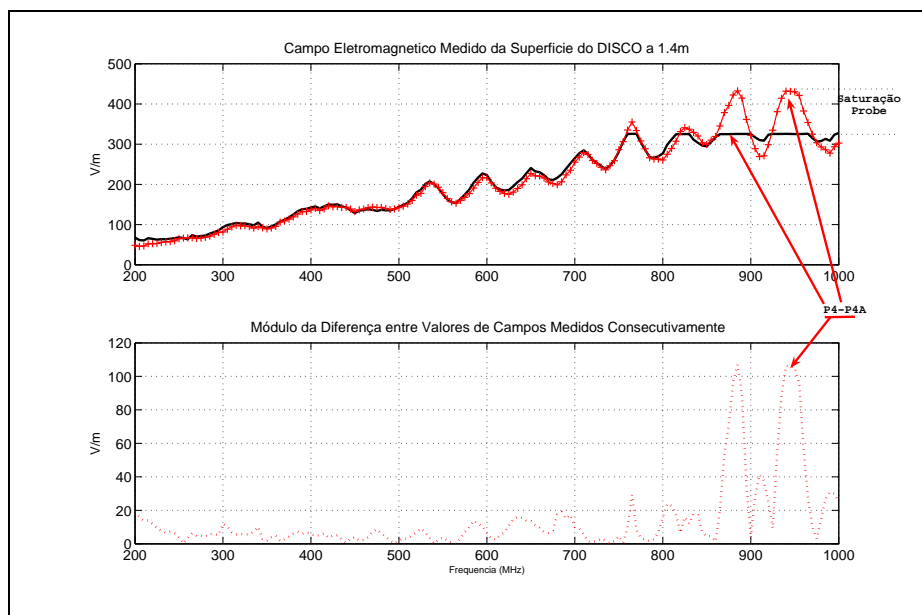


Figura 2.14: *Saturação do Sensor de Campo*

2.4.7 Potência Líquida *versus* Campo Medido

Por trata-se de um sistema não linear, a variação da potência de excitação não necessariamente gera uma variação correspondente no campo medido pelo sensor. Isso porque para se obter uma variação no nível de potência líquida na saída do amplificador, é necessário variar também o sinal de entrada do amplificador, não apenas o ganho, como se poderia pensar. Esse fato implicou em uma dificuldade adicional, visto que para medições de campo eletromagnético em OATS é necessário reduzir substancialmente a potência líquida do sistema, para manter os campos em níveis toleráveis quanto à saúde humana, pois os experimentos ali realizados não dispuseram de cabine isolada para os equipamentos do sistema.

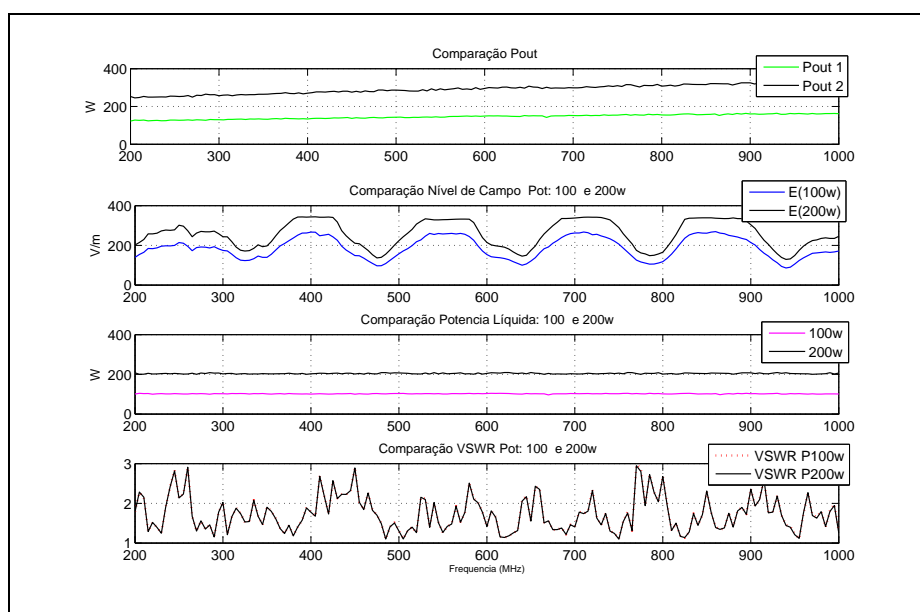


Figura 2.15: *Controle da Potência de Saída: 1.Potência Direta; 2.Campo; 3.Potência Líquida; 4.Nível de VSWR*

Como pode ser visto na Fig.2.15 o programa de controle do sistema de imunidade EMS-K1 fabricado pela empresa *Rohde & Schwarz* é capaz de controlar o sistema de maneira que a saída de potência do amplificador esteja dentro de limites entre $\pm 0,2$ dB, promovendo uma excursão linear da potência de saída.

Podemos ainda verificar que a potência direta Fig.2.15 (curva 1) aumenta com o aumento da frequência de ensaio, uma vez que as perdas são proporcionais a frequência e a potência líquida Fig.2.15 (curva 3) não se altera. O campo resultante Fig.2.15 (curva 2) prevalece inalterado, exceto pela saturação do sensor de campo a partir de 350 V/m com duração de 1s em cada intervalo de frequência. Outro aspecto observado foi que, a única modificação inserida nesses testes foi a potência de excitação. Esperávamos, como foi comprovado Fig.2.15 (curva 4), que a relação de ondas estacionárias (TOI ou *VSWR*) se mantivesse inalterado nos dois ensaios.

2.5 Experimento # 1

O primeiro experimento tem o objetivo de medir campos eletromagnéticos gerados pelo sistema de excitação descrito Anteriormente, propagando em espaço livre (espaço sem a presença do plano terra). A montagem que propiciou estas medições foi planejada como mostra a Fig.2.16. Foi necessário, montar sob a antena 3106 uma plataforma de madeira com o objetivo de posicionar o disco de medição paralelamente à direção de propagação de campo em distâncias estabelecidas. A antena, por sua vez, foi posicionada acima de uma placa metálica, sob o solo, com sua abertura voltada para o céu.

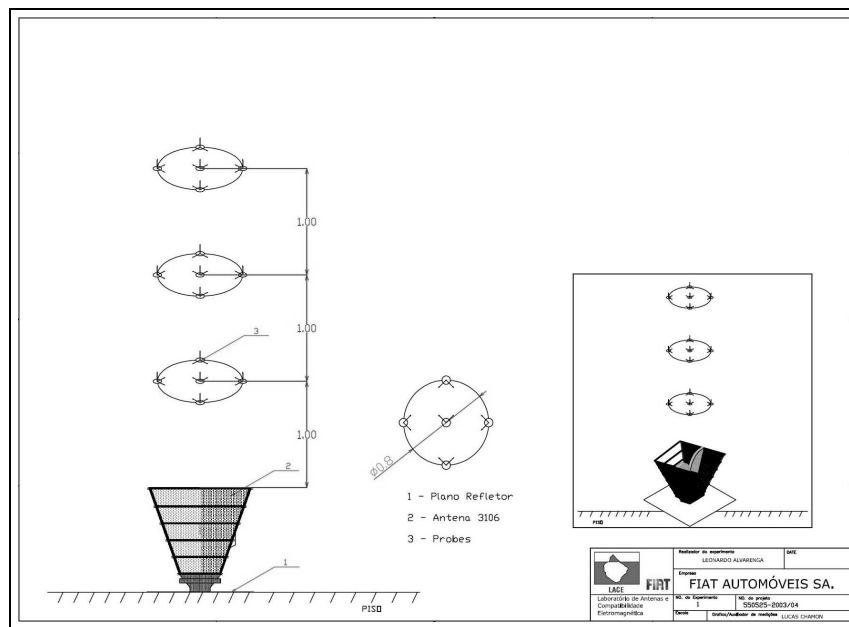


Figura 2.16: Projeto do Experimento #1

Uma vez realizado o experimento# 1, os dados coletados serão utilizados para a qualificação da entidade de campo eletromagnético gerado na câmara semi-anecóica do LACE. Por isso, foram definidos alguns limites quanto a realização do experimento # 1:

- Para comparar-mos os resultados dos experimentos # 1 e # 2, é necessário realizarmos medições até a altura de 1,5 m a partir da abertura da antena, como indicado na Fig.2.16.

- Foi inserido um refletor na base da antena para que os dados de medição fossem comparados aos dados coletados no experimento # 2 e em sequência, comparados aos dados coletados no experimento # 3, evitando-se inserir novas variáveis na medição.



Figura 2.17: *Experimento #1*

Foram realizadas medições a 0,5m , 1,0m e 1,5m, com variações máximas de 0,05m entre o plano de medição (disco) e a abertura da antena. A potência líquida de excitação do sistema foi de 200 W ($\pm 0,2$ dB).

Espera-se que a inserção de um refletor na parte anterior da antena não resulte em distorções que comprometam os resultados das medições uma vez que a antena 3106, sendo corneta, apresenta alta ‘diretividade’, mesmo em frequências superiores a 700 MHz onde ocorrem a manifestações de lóbulos laterais, como demonstrado no apêndice referente à antena. Assim, o refletor foi adicionado nas medições dos experimentos # 2 e # 3.

Os resultados do experimento # 1, serão apresentados junto aos do experimento # 2.

2.6 Experimento # 2

O experimento# 2 foi projetado com o objetivo de verificar o quanto o ambiente eletromagnético da câmara semi-anecóica do LACE se aproxima do espaço aberto, com ênfase na análise da eficiência dos absorvedores de energia eletromagnética instalados no interior da câmara. A Fig.2.18 mostra o projeto do experimento, ressaltando as dimensões envolvidas no arranjo.

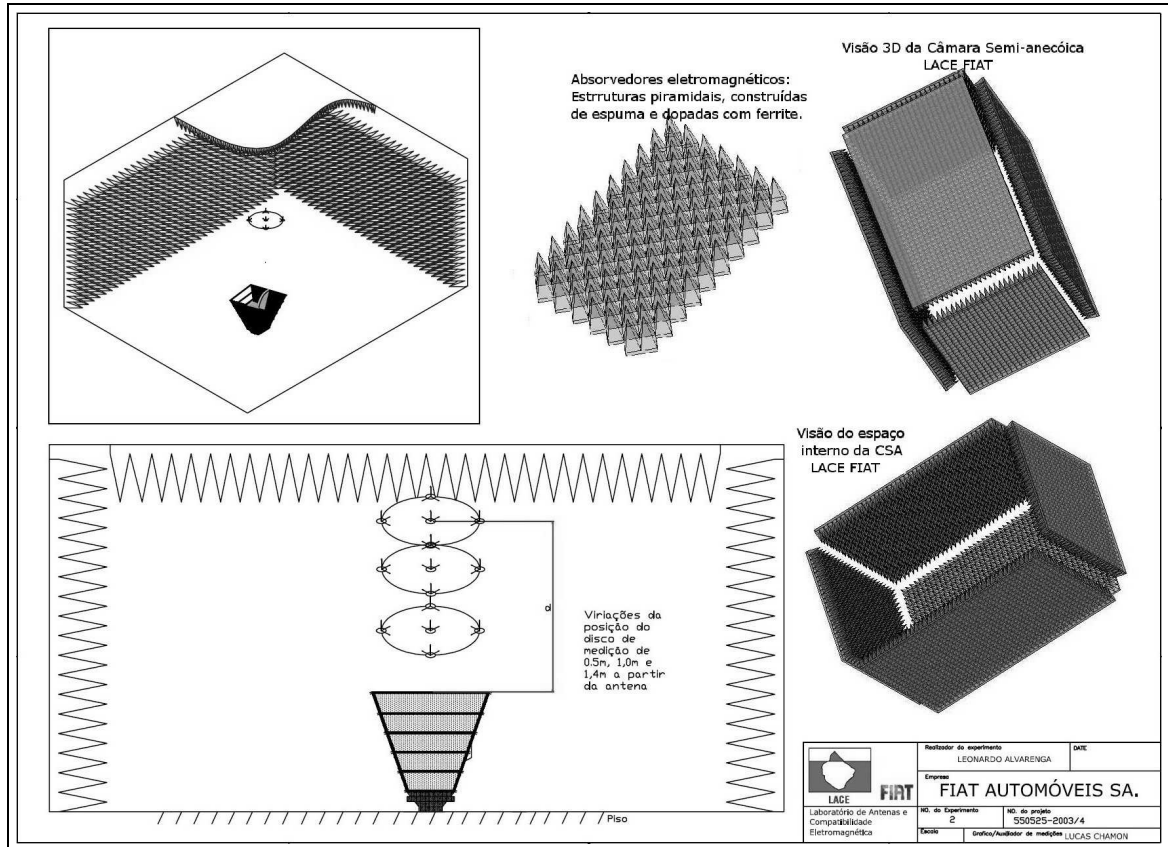


Figura 2.18: Projeto do Experimento #2

Foi realizado um conjunto de 15 experimentos, 5 medições para cada altura (0,5m , 1,0m , 1,4m; $\pm 0,05m$). A potência de excitação líquida do sistema foi mantida em 200 W ($\pm 0,2$ dB).



Figura 2.19: *Fotografia do Experimento #2*

Devido a sua natureza construtiva a antena 3106, apresenta uma “*polarização natural*” de maneira que o campo resultante gerado por ela em polarização vertical difere do horizontal. Além de sofrer a interação do plano de massa do piso, o campo resultante apresenta grande variação no módulo de radiação principal, para cada faixa de frequência, caracteristicamente de 100 em 100 MHz a partir de 400 MHz conforme mostra a Fig. 2.20.

Na faixa de 200 MHz a 400 MHz o diagrama de radiação da antena 3106 é quase esférico, mas a medida que a frequência aumenta, há deformação na *isotropicidade* do campo gerado.

Podemos verificar na Fig.2.20 que existe a formação de lóbulos laterais ou secundários. Outro ponto que pode ser observado é que o feixe de campo gerado pela antena a medida que a frequência é elevada, vai se tornando mais centralizado, caracterizando a alta *diretividade* dessa antena. Na frequência de 1 GHz a área correspondente a campo máximos gerado pela antena 3106 é de 33% se comparado à frequência de 400 MHz.

Espera-se portanto que as diferenças de medições entre espaço livre e interior da câmara semi-anechoica (experimentos # 1 e #2) vão se elevando com o acréscimo da frequência, devido a incerteza de posicionamento do sensor.

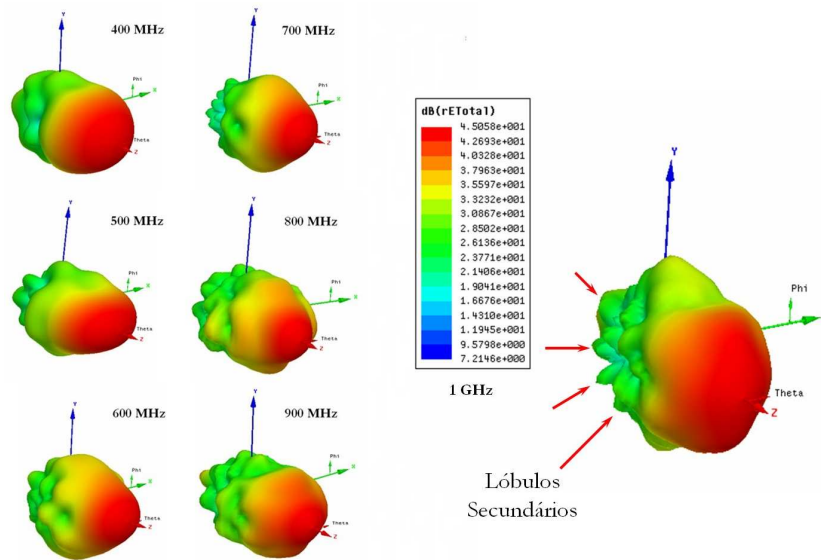


Figura 2.20: *Detalhe dos Lóbulos Secundários a 1GHz e Diagramas de radiação 3D: Polarização Vertical*

A Fig.2.21 mostra o resultados das medições realizadas nos experimentos #1 e #2 em que o disco de medição foi posicionado a 0,5m da abertura da antena 3106. Estes resultados referem-se apenas ao ponto central do disco de medição (ponto V).

Podemos observar que a diferença entre os campos medidos a 0,5m da antena em ambiente anecóico e em espaço livre podem ser considerados equivalentes. Esse resultado é devido à própria natureza de propagação do campo. Como a antena emite o campo de maneira divergente, em outras palavras, o campo é espalhado para o espaço, o efeito das reflexões geradas pelos absorvedores é pouco expressivo.

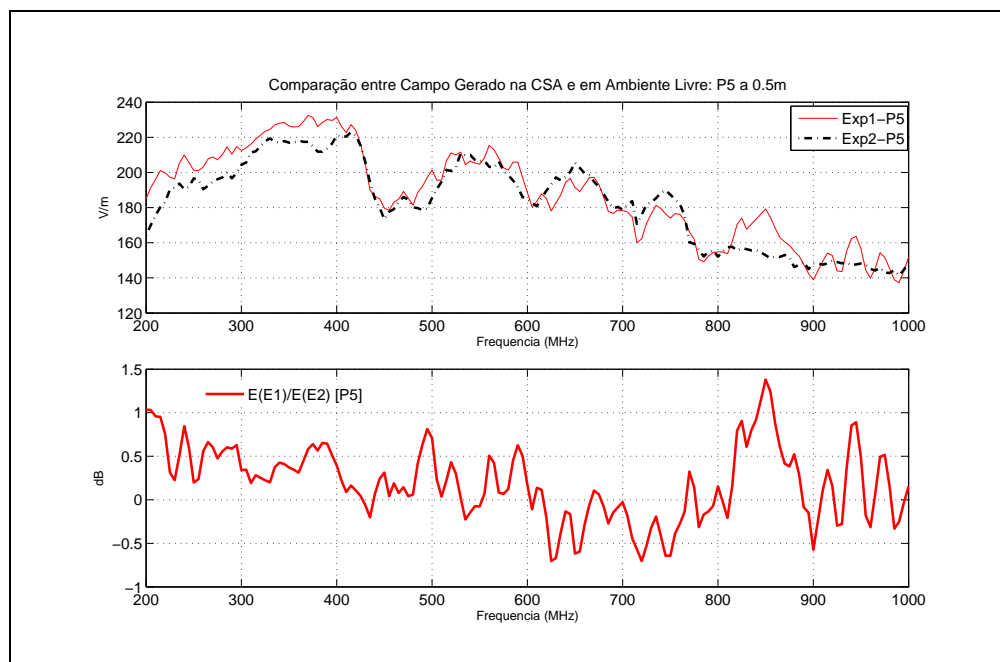


Figura 2.21: Campos Medidos nos Experimentos #1 e #2 a 0,5m da abertura da antena 3106

A Fig.2.22 mostra o resultados das medições realizadas nos experimentos #1 e #2 em que o disco de medição foi posicionado a 1,0m da abertura da antena 3106. Foram monitorados cinco pontos de medição no disco.

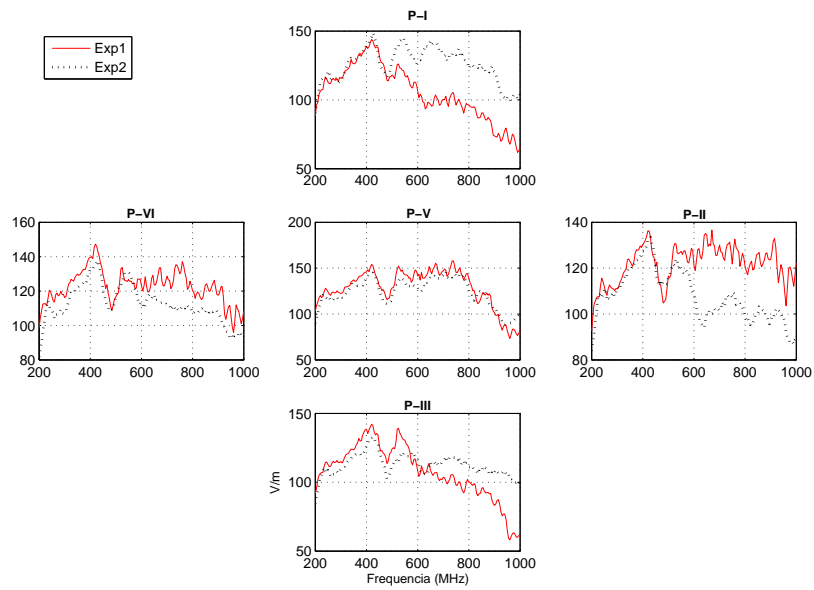


Figura 2.22: *Campos Medidos nos Experimentos #1 e #2 a 1,0m da abertura da antena 3106*

Esperava-se que as medições nos pontos II e IV assim como I e III apresentassem resultados similares, pois a antena apresenta simetria tanto em relação ao eixo vertical quanto horizontal.

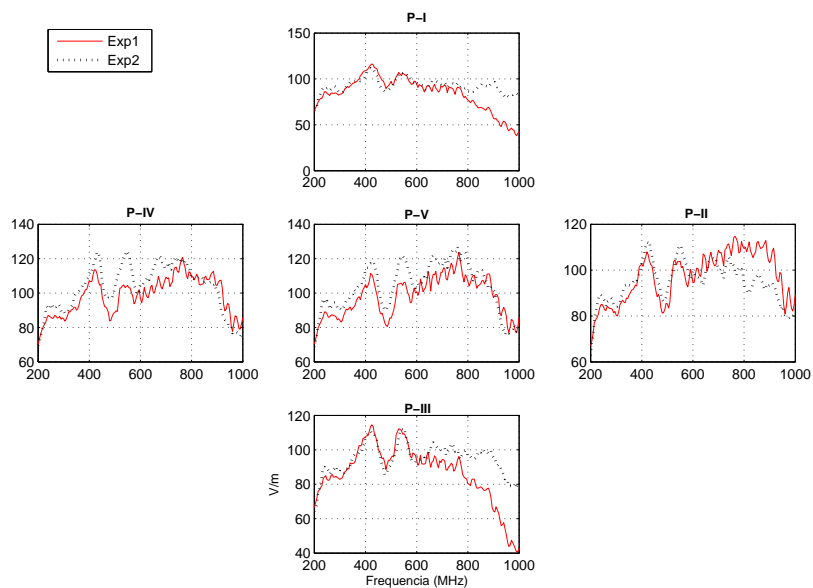


Figura 2.23: *Campos Medidos nos Experimentos #1 e #2 a 1,5m da abertura da antena 3106*

Quando realizamos a mesma comparação (experimento #1 e #2) a 1,5m dentre disco de medição e a abertura da antena verificamos que as diferenças entre os resultados dos experimentos tornaram-se mais acentuada. Como pode ser verificado na Fig.2.23.

Outra maneira de quantificar a diferença existente entre os campos medidos na mesma posição relativa entre disco de medição e antena é expressa nas Fig.2.24 e Fig.2.25, para as distâncias de 1,0 m e 1,5 m respectivamente.

Com base nos experimentos demonstrados, pode-se concluir que existe um efeito não homogêneo de absorção de campos eletromagnéticos por parte dos absorvedores internos da câmara semi-anecóica. Isso porque as pirâmides internas que recobrem o teto da câmara são de dimensão de 15 cm x 15 cm x 50 cm, assim os vértices desses absorvedores foram distribuídos ao acaso em relação à posição do disco de medição.

No ponto central de medição, ponto V, observa-se que mesmo afastando-se de 1,0 m para 1,5 m a diferença entre os campos medidos não é superior a 1,5 dB. Se compararmos os valores de campos medidos nos pontos II-IV e I-III observamos um aumento na diferença entre as medições realizadas nos experimentos #2 e #3. Essa diferença é crescente no espectro de frequência, substancialmente devido a *diretividade* da antena 3106 que acentua-se a medida que a frequência aumenta.

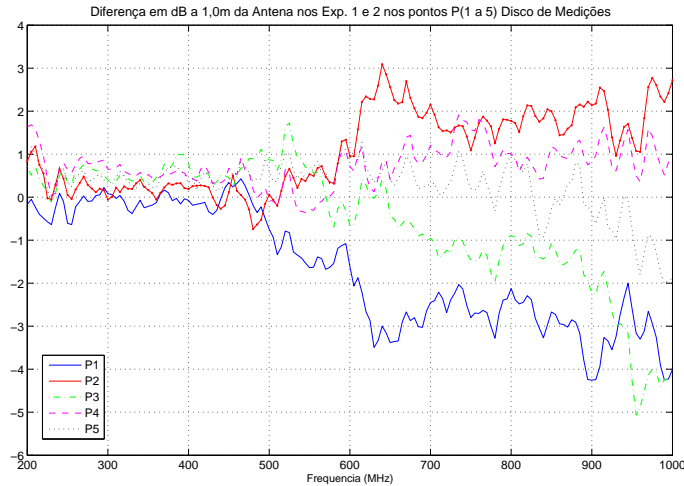


Figura 2.24: *Comparação entre Campos Medidos a 1,0m nos Exp. #1 e #2*

Quando o ponto de medição é suficientemente afastado dos absorvedores presume-se haver uma absorção homogênea de campos eletromagnéticos. À medida que aproximamos o disco de medição dos absorvedores observamos que existem níveis de reflexões diferentes para os pontos mais próximos aos cumes dos absorvedores que em relação a seus vales.

A Fig. 2.26 é uma fotografia do posicionamento do disco de medição no experimento #2. Podemos estimar a distribuição dos cumes dos absorvedores a partir da análise da instalação desses na câmara, que segue um padrão linear.

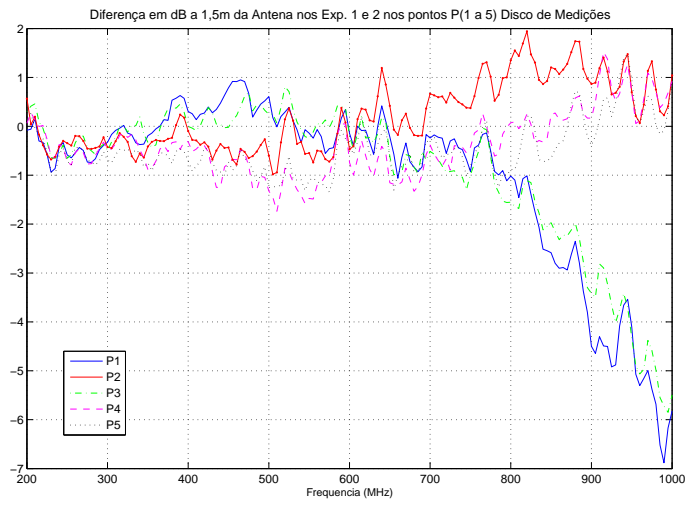


Figura 2.25: *Comparação entre Campos Medidos a 1,5m nos Exp. #1 e #2*

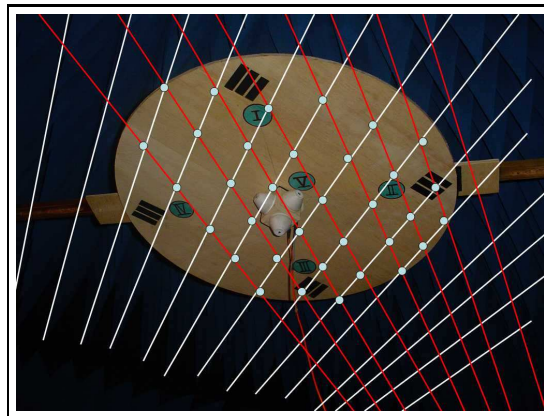


Figura 2.26: *Provável posição dos absorvedores de campo em relação ao disco de medição*

2.7 Experimento # 3

O experimento# 3 foi projetado com o objetivo de verificar o efeito das reflexões dos campos eletromagnéticos emitidos pela antena 3106. Busca-se também com a realização desse experimento, ter uma visão geral da distribuição de campo quando a antena 3106 é aproximada do objeto espalhador, que no caso é o próprio piso da câmara. A Fig. 2.27 mostra uma fotografia do arranjo.

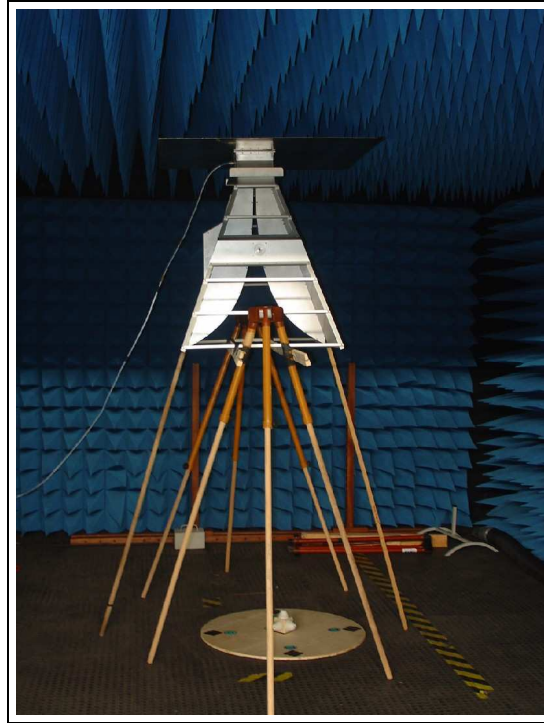


Figura 2.27: *Projeto do Experimento #3*

Foi realizado um conjunto de 15 experimentos, 5 medições para cada altura (0,50m , 1,00m , 1,45 m) do piso da câmara, mantendo-se constante a posição da antena próxima ao teto. A potência de excitação líquida do sistema foi mantida em 200 W ($\pm 0,2$ dB) em todos as medições.

Os resultados são mostrados através das seguintes figuras:

- A Fig. 2.28 mostra o resultados das medições realizadas no experimento #3 em que o disco de medição foi posicionado a 0,5m, 1,0m e 1,45 m de distância da abertura da antena 3106.
- A Fig. 2.29 mostra o resultados das medições realizadas no experimento #3 em que o disco de medição foi posicionado a 0,5m, 1,0m e 1,45 m de distância da abertura da antena 3106. Cada gráfico da figura é correspondente as posições I-II-III-IV-V do disco de medição.

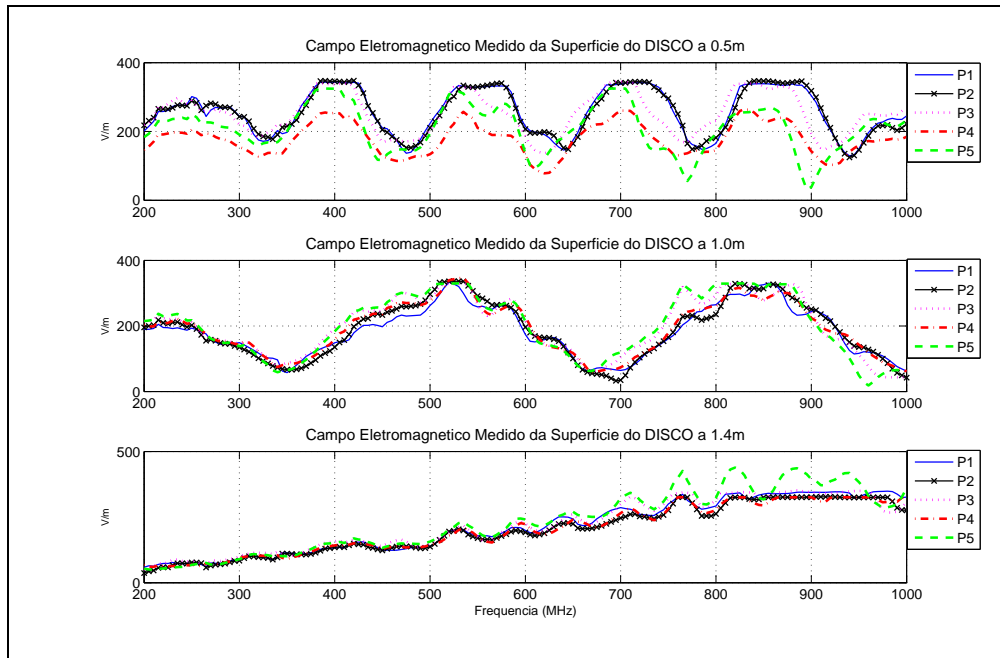


Figura 2.28: Campos Medidos nos Experimento #3 a 0,5m , 1,0m , 1,4m; $\pm 0,05m$: Agrupados por distância entre antena e disco de medição

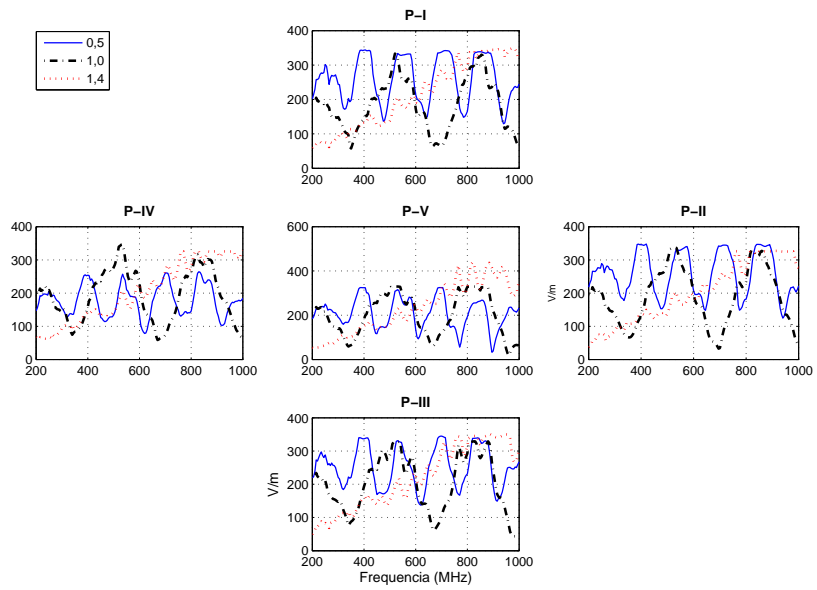


Figura 2.29: Campos Medidos nos Experimento #3 a 0,5m, 1,0m e 1,45 m: Separados por Pontos de medição de I a V

Os resultados do experimento #3 foram comparados com os dados obtidos no experimento #2, como mostram as figuras:

- A Fig. 2.30 mostra o resultados das medições realizadas nos experimentos #2 e #3 em que o disco de medição foi posicionado a 0,5m da abertura da antena 3106. No caso do experimento #3, isso representa uma altura do disco de medição em relação ao piso da câmara de 1,0m.
- A Fig. 2.31 mostra o resultados das medições realizadas nos experimentos #2 e #3 em que o disco de medição foi posicionado a 1,0m da abertura da antena 3106. No caso do experimento #3, isso representa uma altura do disco de medição em relação ao piso da câmara de 0,5m.
- A Fig. 2.32 mostra o resultados das medições realizadas nos experimentos #2 e #3 em que o disco de medição foi posicionado a 1,45m da abertura da antena 3106. No caso do experimento #3, isso representa que o disco de medição foi colocado sob o piso da câmara.

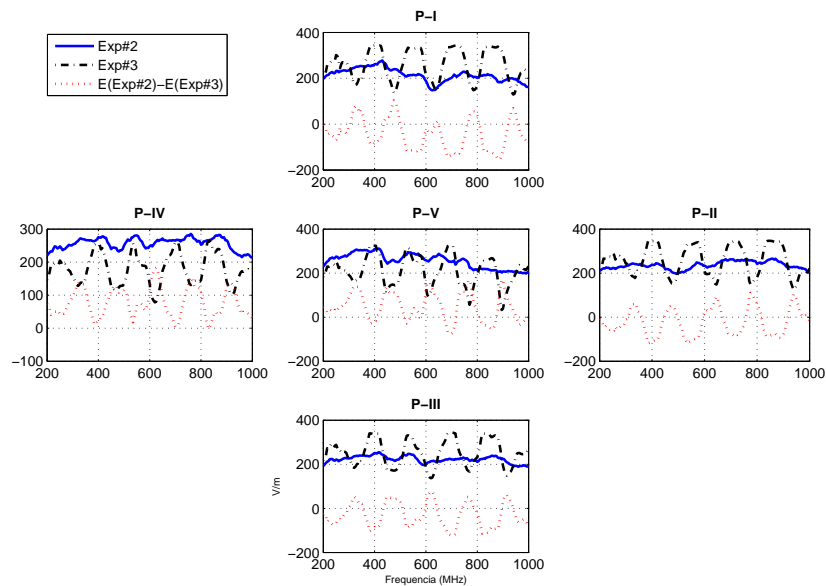


Figura 2.30: *Campos Medidos nos Experimentos #2 e #3 a 0,5m*

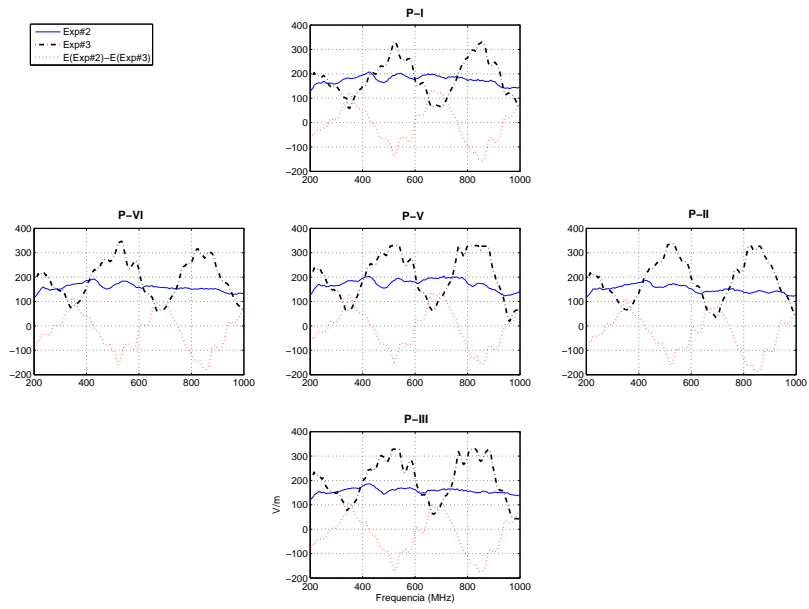


Figura 2.31: *Campos Medidos nos Experimentos #2 e #3 a 1,0m*

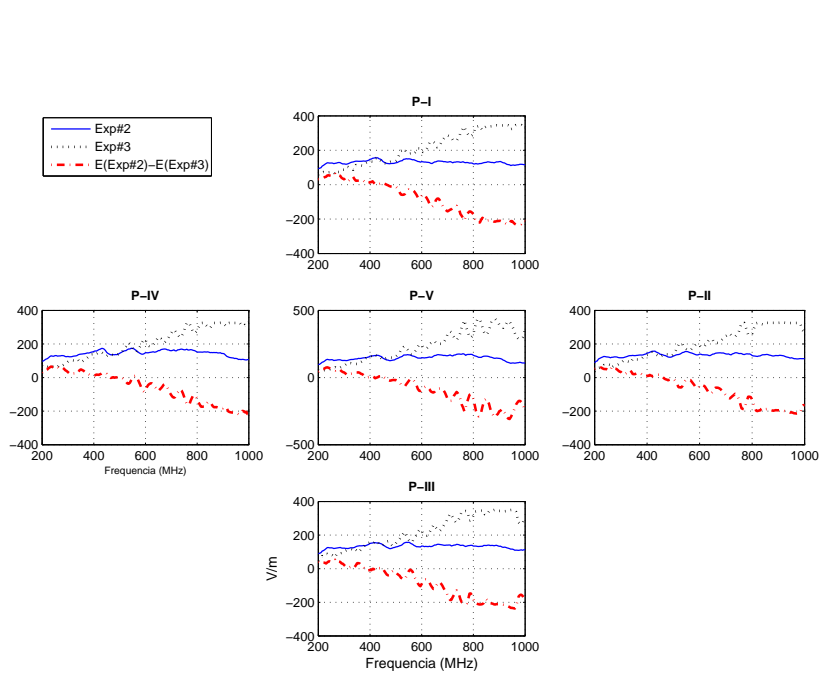


Figura 2.32: Campos Medidos nos Experimentos #2 e #3 a 1,45m

Observou-se que à medida que a frequência de teste aumenta, maior se torna a diferença entre os campos medidos nos experimentos #2 e #3. Isso se deve ao diagrama de radiação da antena corneta 3106 se tornar mais convergente a medida que a frequência aumenta, como mostrado na seção precedente. Em especial se percebe que as maiores diferenças entre as medições realizadas nos experimentos #2 e #3 foram encontradas nos pontos situados próximo a borda do disco de medição, ressaltando a hipótese da diferença verificada entre os resultados ser devida, fundamentalmente a não homogeneidade de absorção.

Comparando os resultados do experimento #2 e #3, percebe-se o efeito de interferência construtivas e destrutivas, dadas em função da distância entre o refletor e a abertura da antena. Observa-se interferências construtivas quando a amplitude de campo medido no experimento #3, for superior ao medido no experimento #2, e destrutivas quando ocorrer o contrário.

Este comportamento se assemelha a ondas estacionárias contidas em uma linha de transmissão, conforme pode ser observado em [Pau92], capítulo 4, em que, na descrição no domínio do tempo apresenta o fenômeno de propagação de uma onda TEM. Devemos considerar apenas que ao invés de considerar o comprimento do condutor, no caso da analogia proposta, devemos considerar o comprimento de onda do sinal gerado, visto que os gráficos apresentados nessa seção foram obtidos no domínio da frequência.

2.8 Experimento # 4

O experimento #4 tem o objetivo de verificar as características da entidade de campo eletromagnético de um teste de imunidade veicular. Nos experimentos anteriores foram realizados para avaliar separadamente a natureza da propagação do campo eletromagnético no espaço livre e as contribuições fornecidas pela reflexão do objeto espalhador no campo total presente nos ensaios.

O experimento #4 foi montado com a antena em polarização vertical e horizontal, projetando o campo paralelamente ao plano de terra (plano condutor da câmara), conforme mostra a Fig.2.33.

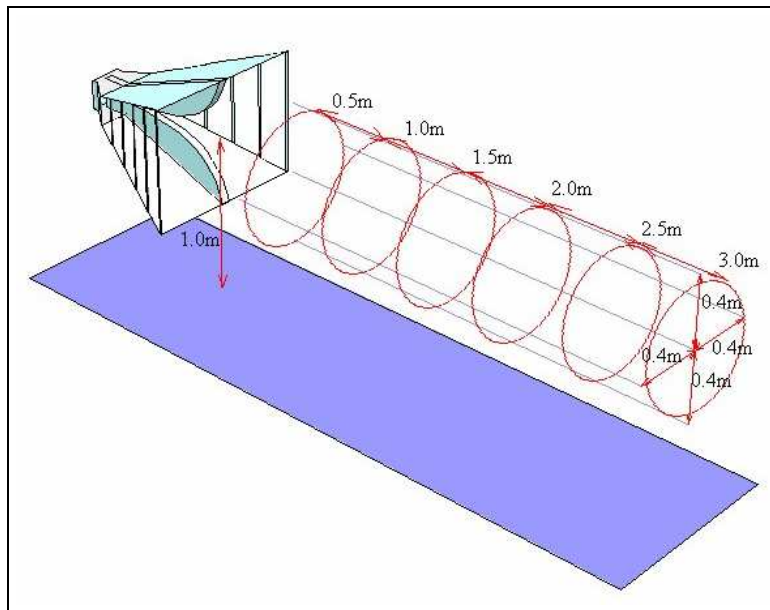
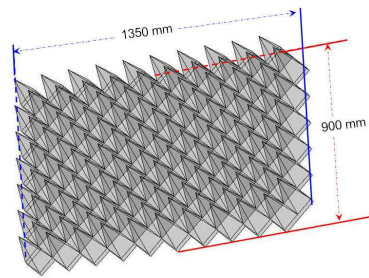


Figura 2.33: Projeto Experimento #4

A 0,5m da antena, foi inserido um bloco de absorvedores eletromagnéticos do mesmo tipo que reveste internamente o interior da câmara. As dimensões do bloco de absorvedores podem ser vistas na Fig.2.34. A altura dos absorvedores é de 0,5m e acima destes foi montado o disco de medição conforme mostra a Fig.2.35.



Ponto 1 - P1
 Ponto 2 - P2
 Ponto 3 - P3
 Ponto 4 - P4
 Ponto 5 - P5

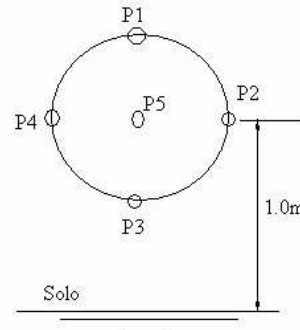


Figura 2.34: *Bloco de absorvedores avulso: Experimento #4*

Figura 2.35: *Posicionamento do Disco Experimento #4*

A potência de excitação líquida do sistema foi mantida em 200 W ($\pm 0,2$ dB). Foram realizadas 120 medições, divididas em dois conjuntos:

- Um conjunto de 60 medições em que o disco de medição foi inserido à frente da antena em polarização vertical e depois horizontal, nas distância de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m (cinco medições para cada posição). Para a realização dessas medições, foi inserido o conjunto de absorvedores a uma distância de 0,5m da abertura da antena, conforme ilustrado na Fig.2.36.
- Um conjunto de 60 medições em que o disco de medição foi inserido à frente da antena em polarização vertical e depois horizontal, nas distância de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m (cinco medições para cada posição).



Figura 2.36: *Fotografia da Montagem Exp.#4*

2.8.1 Experimento # 4: Resultados

Uma forma de se visualizar a propagação do campo eletromagnético, avaliando o efeito de redução das reflexões do piso evidenciadas pela inserção de absorvedores, é criando uma linha de medição, que passa por cada ponto de medição (P-I a P-V) nas distâncias de 0,5m a 3,0m.

A Fig.2.37 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 1 (P-I) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *horizontal* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

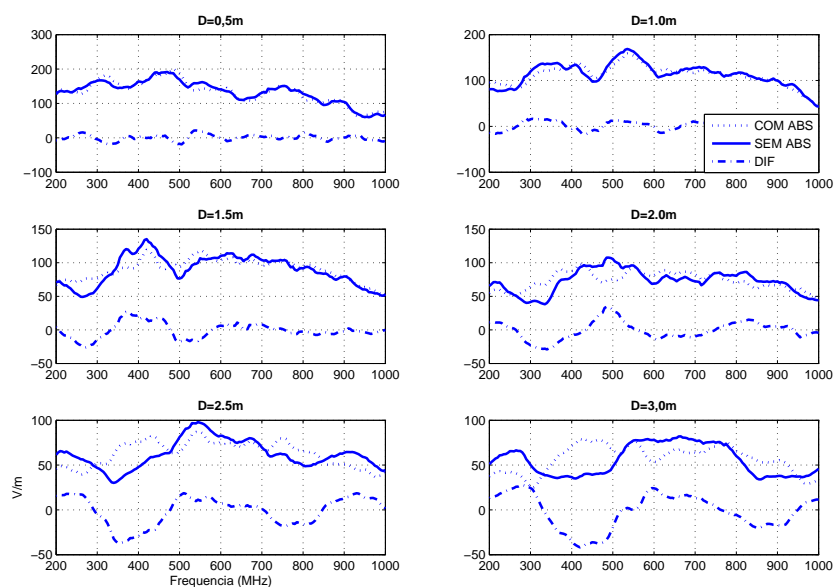


Figura 2.37: *Exp.#4 : Linha de Medição P-I, Polarização Horizontal*

A Fig.2.38 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 2 (P-II) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *horizontal* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

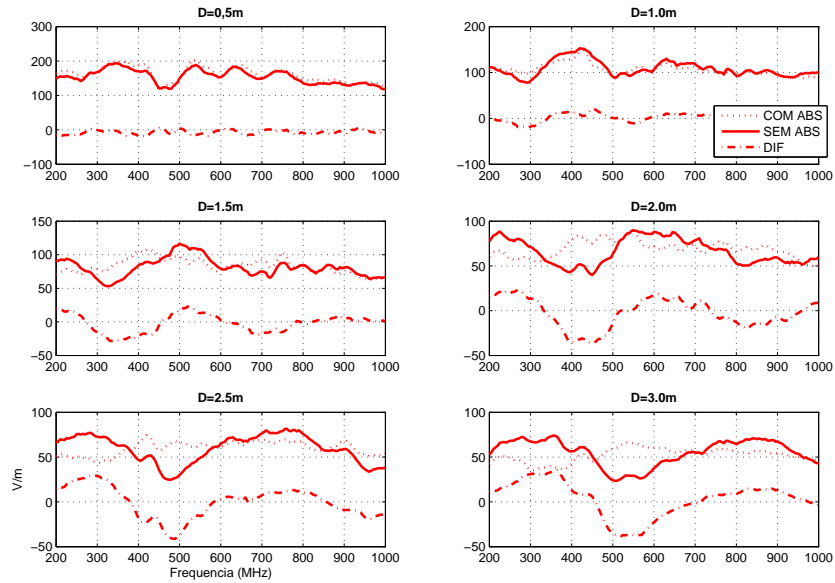


Figura 2.38: *Exp.#4 : Linha de Medição P-II, Polarização Horizontal*

A Fig.2.39 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 3 (P-III) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *horizontal* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

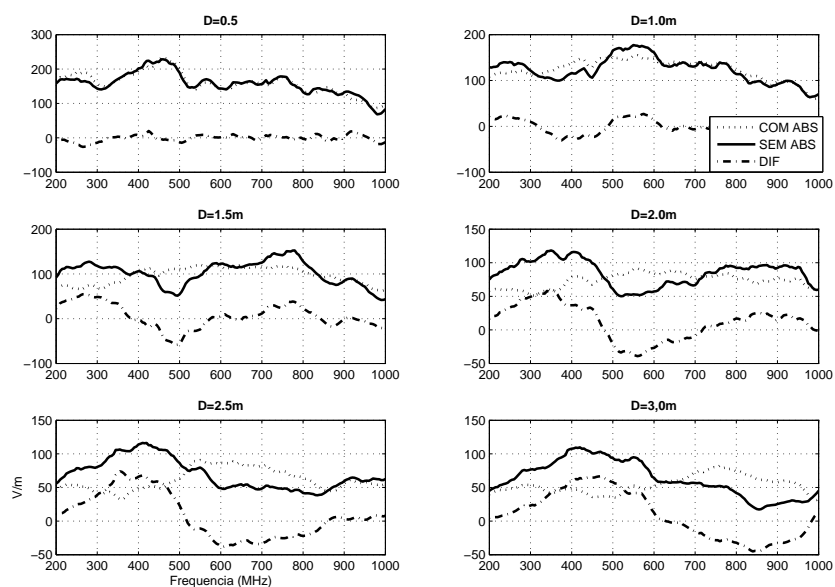


Figura 2.39: *Exp.#4 : Linha de Medição P-III, Polarização Horizontal*

A Fig.2.40 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 4 (P-IV) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *horizontal* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

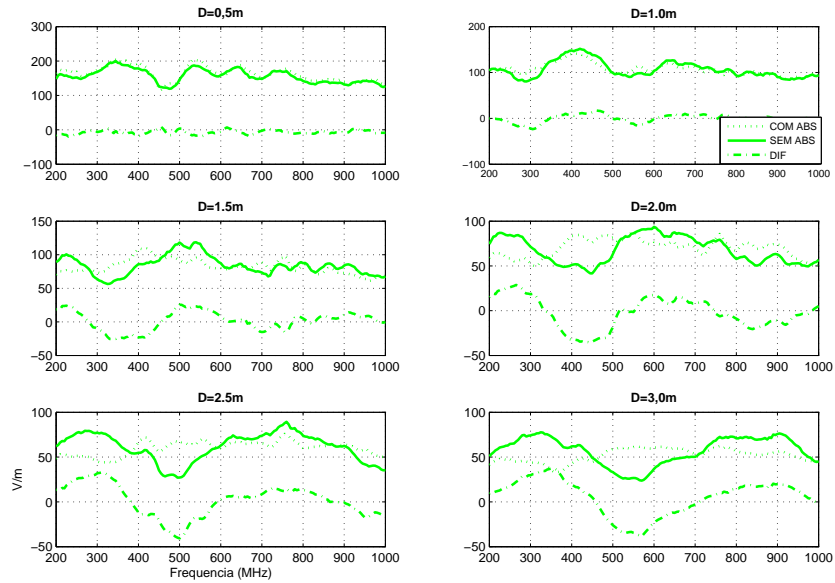


Figura 2.40: *Exp.#4 : Linha de Medição P-IV, Polarização Horizontal*

A Fig.2.41 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 5 (P-V) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *horizontal* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. È apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

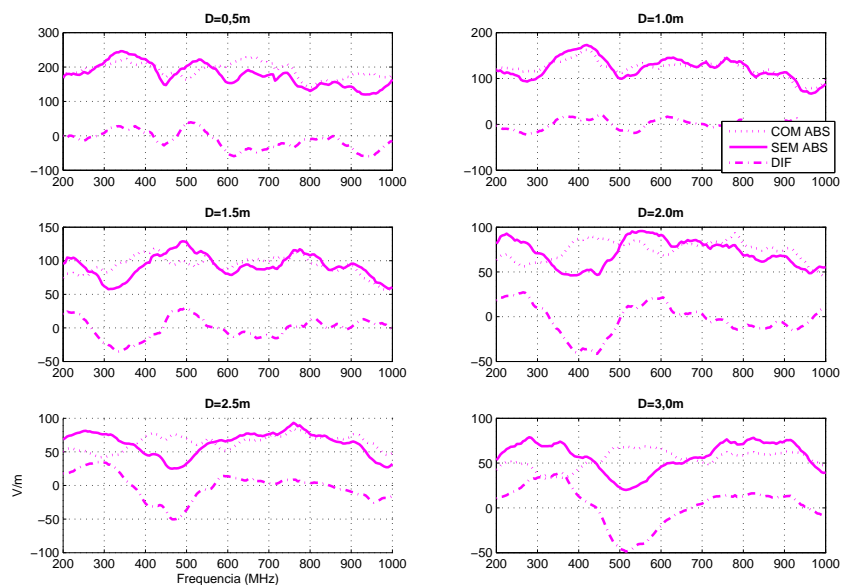


Figura 2.41: *Exp.#4 : Linha de Medição P-V, Polarização Horizontal*

A Fig.2.42 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 1 (P-I) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *vertical* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. È apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

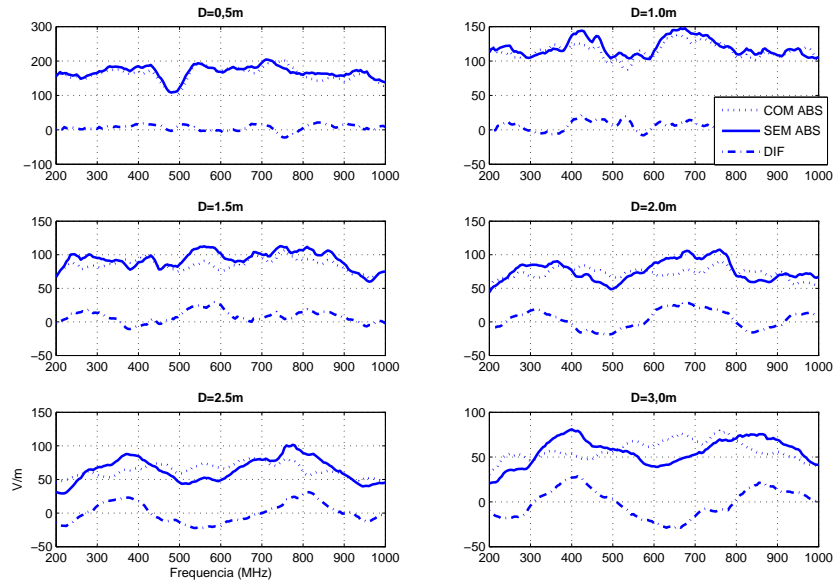


Figura 2.42: *Exp.#4 : Linha de Medição P-I, Polarização Vertical*

A Fig.2.43 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 2 (P-II) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *vertical* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

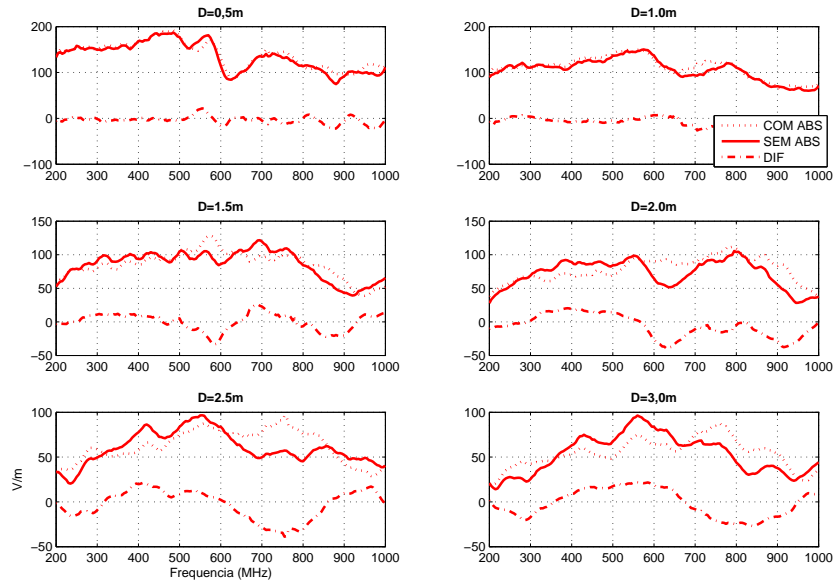


Figura 2.43: *Exp.#4 : Linha de Medição P-II, Polarização Vertical*

A Fig.2.44 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 3 (P-III) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *vertical* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

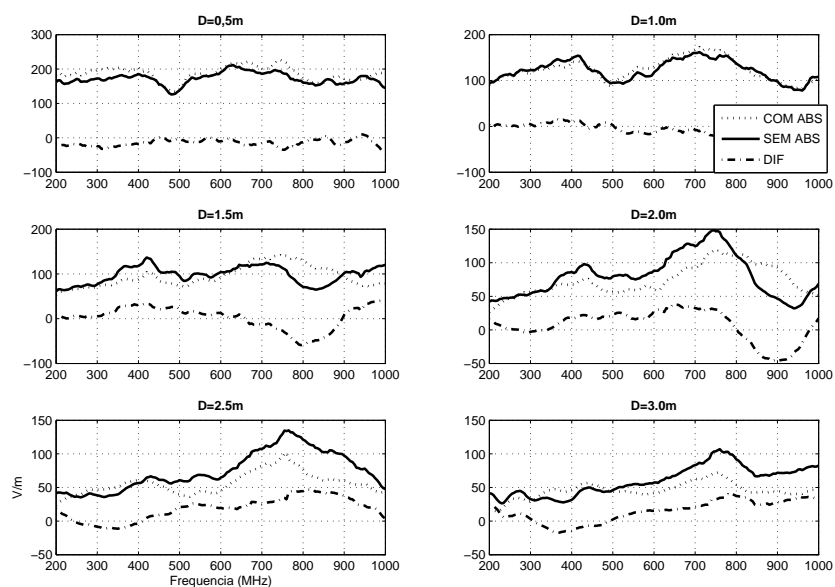


Figura 2.44: *Exp.#4 : Linha de Medição P-III, Polarização Vertical*

A Fig.2.45 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 4 (P-IV) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *vertical* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. É apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

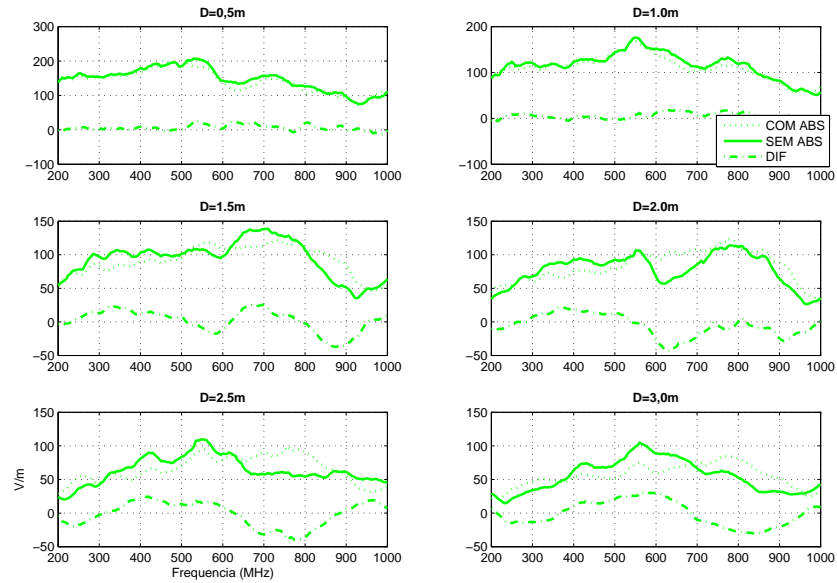


Figura 2.45: *Exp.#4 : Linha de Medição P-IV, Polarização Vertical*

A Fig.2.46 apresenta uma comparação entre os campos eletromagnéticos medidos na posição 5 (P-V) do disco de medição, às distâncias de 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m da abertura da antena 3106 instalada em polarização *vertical* em relação ao piso, com e sem a presença de absorvedores montados no piso da câmara. È apresentada uma curva adicional *DIF* resultado da diferença entre os valores de campo medidos, para cada frequência do experimento.

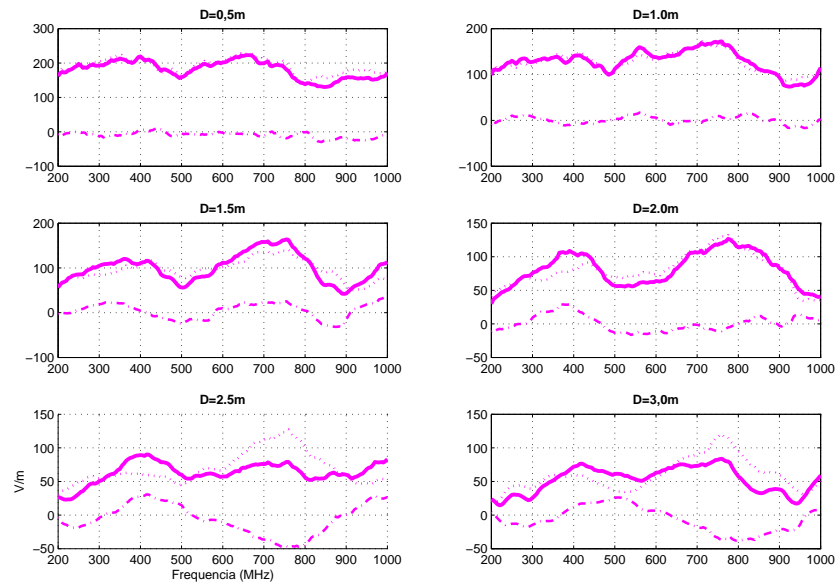


Figura 2.46: *Exp.#4 : Linha de Medição P-V, Polarização Vertical*

A seguir, são apresentados os resultados das medições no ponto V do disco, com e sem absorvedores eletromagnéticos nas distância de 0,5 a 3,0m.

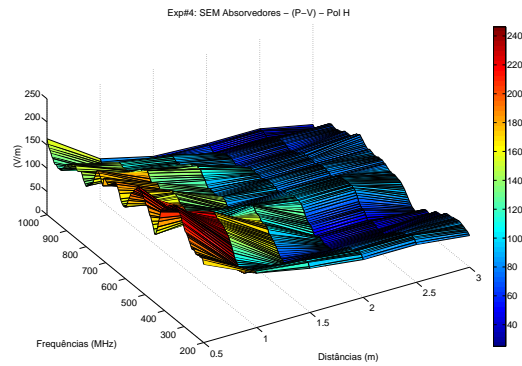


Figura 2.47: *Exp.#4: Linha de Medição P-V, SEM abs. Pol.H*

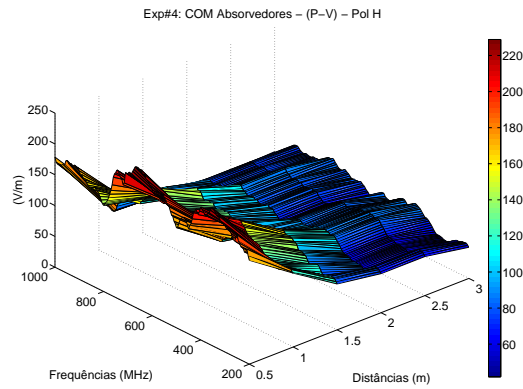


Figura 2.48: *Exp.#4: Linha de Medição P-V, COM abs. Pol. H*

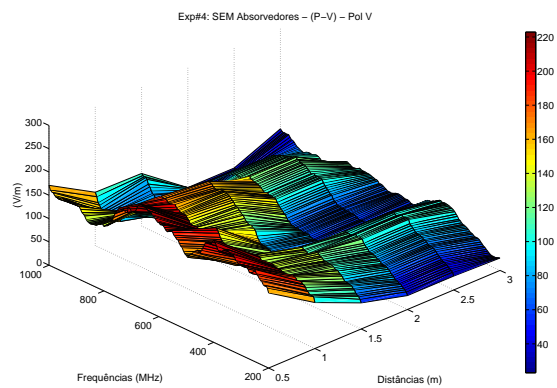


Figura 2.49: *Exp.#4: Linha de Medição P-V, SEM abs. Pol. V*

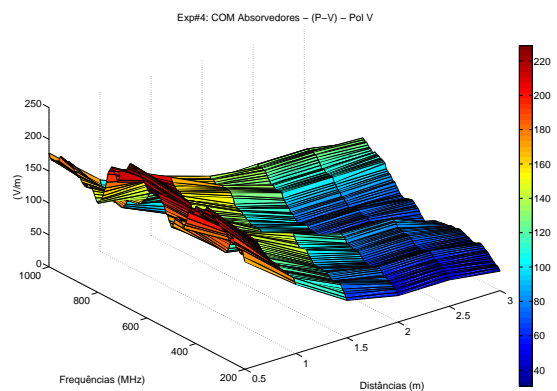


Figura 2.50: *Exp.#4: Linha de Medição P-V, COM abs. Pol. V*

As diferenças entre os campos foram obtidas subtraindo os valores de campo medidos sem a presença dos absorvedores dos com absorvedores.

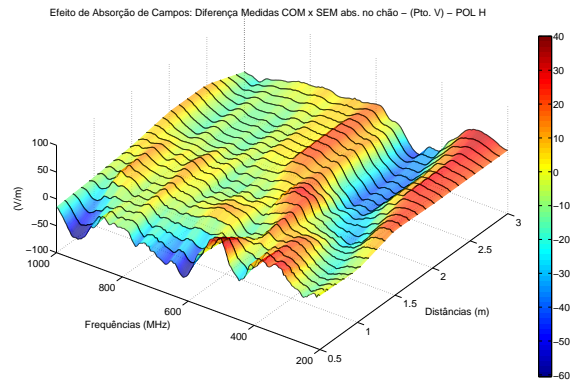


Figura 2.51: *Exp.#4: Diferença Medida COM X SEM abs., Pol. H*

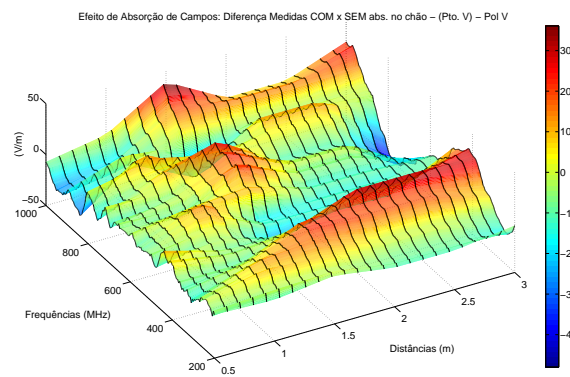


Figura 2.52: *Exp.#4: Diferença Medida COM X SEM abs., Pol. V*

Conclusões:

Quando verificamos a diferenças entre os campos radiados medidos com e sem a presença de absorvedores eletromagnéticos podemos afirmar que:

- A presença dos absorvedores produz maior estabilidade durante a propagação do campo eletromagnético, verificada através das variação de amplitude do campo ao longo da distância de medição, em todos os pontos de medição;
- A 0,5m de distância entre o disco de medição e antena, quase não é perceptível a influência dos absorvedores, tanto em polarização vertical quanto horizontal. Isso é devido à instalação do bloco de absorvedores estar distante a 0,5m da antena;
- Nos pontos P-II e P-IV, verifica-se a simetria do campo gerado pela antena 3106 tanto em polarização vertical quanto horizontal, de maneira que o campo resultante permanece estável nas condições com e sem absorvedores no piso nesses pontos;
- Nos pontos P-I e P-III, verifica-se a crescente assimetria à medida que afastamos o disco de medição da antena 3106. Esse resultado é devido a forte influência (até 7 dB) dos absorvedores nas reflexões verificadas no ponto P-III de medição, enquanto no ponto P-I as variações são relativamente baixas (aproximadamente 3 dB), sobretudo quando a antena 3106 é polarizada horizontalmente.

Embora a antena 3106 apresente alta *diretividade*, as contribuições do plano de massa não podem ser desprezadas. Quanto trata-se da aproximação de veículo à antena, além do acoplamento entre antena e veículo, as reflexões podem resultar em uma difusão do campo no interior do veículo.

Capítulo 3

Experimentos Realizados em Veículos

Nesse capítulo buscaremos demonstrar os efeitos da uniformidade de campo distribuído no interior de um veículo, quando avaliado conforme a norma NBR-ISO11451-2 e a proposta de redução da montagem. O problema se estabelece a partir do desconhecimento de duas variáveis [IB92]:

1. fator de *decaimento* de campo para redução de distância dos experimentos;
2. fator de similaridade entre carro inteiro e cortado.

Para se estabelecer uma sequência lógica de determinação destas variáveis através de experimentos, sumariamente, foram realizados os seguintes passos:

- Foi montado um plano de massa de dimensões 5 m x 10 m, conforme recomendação de mínimas dimensões em relação ao DUT (*device under test*) conforme norma CISPR-16 (elipse de medição) [INT11], no interior do LEAT (UFMG), caracterizando um ambiente de medição tipo OATS. Neste ambiente de medições OATS, foi levantado o erro entre as medições realizadas em câmara semi-aneecóica de pequeno porte, para as distâncias de 0,5m, 1,0m, 1,5m, 2,0m, 2,5m e a 3,0m de distância, entre abertura da antena e ponto de medição.
- Foi realizado um conjunto de medições em um veículo simplificado cujas dimensões são próximas às de um veículo real em câmara semi-aneecóica

de pequeno porte em OATS e câmara semi-aneecóica a 1,5m de distância entre antena e veículo. O resultado obtido nessas medições foi uma comparação entre o mapeamento de campo em veículos avaliado em ambiente eletromagnético tipo OATS e CSA de pequeno porte.

- Foi realizado um mapeamento da distribuição de campo no interior de um veículo real nas distâncias de 1,5m e 3,0m da abertura da antena em OATS. Foi verificado o fator de *decaimento* de campo e a influência do afastamento do veículo na distribuição de campo em seu interior.
- Foi realizado um mapeamento da distribuição de campo no interior de um veículo real em câmara semi-aneecóica de dimensões reduzidas a 1,5m de distância da abertura da antena e um mapeamento da distribuição de campo no interior de um veículo real em câmara semi-aneecóica conforme determinações da NBR-ISO11451-2, em ELASIS, Nápoles Itália. Nesse experimento, a partir do fator de *decaimento* de campo levantado anteriormente, os dados foram comparados e concluiu-se a viabilidade da proposta.

3.1 Avaliação do Site Tipo OATS

Para caracterização do ambiente eletromagnético construído no Laboratório de Extra Alta Tensão, LEAT, da UFMG e posteriormente comparar as medições realizadas ali com as realizadas no LACE da FIAT, foi realizado um conjunto de experimentos usando a mesma metodologia de mapeamento de campo utilizado no experimento # 4.

Foi instalado a antena 3106 a 1 metro de altura do piso do OATS e foram medidos os campos eletromagnéticos à distância de 0,5m, 1,0m, 1,5m, 2,0m, 2,5m e a 3,0m da abertura da antena em polarização vertical e horizontal.

Para garantir a idoneidade física dos participantes do ensaio, quando a exposição de campos eletromagnéticos, visto que no LEAT o OATS foi instado sem uma cabine de proteção do pessoal que realizou os ensaios, a potência de excitação do sistema foi reduzida para 30 W ($\pm 0,2$ dB), e mantida constante em toda a faixa de 200 MHz a 1 GHz, sem modulação.

A redução da potência de excitação do ensaio gerou como consequência uma redução na relação sinal/ruído nas medições. Esse aspecto, acrescido ao fato da precariedade das junções entre as placas metálicas, contribuíram significativamente para a introdução de componentes de alta frequência -

difração, sendo necessário à aplicação de filtro (tipo média móvel) e posteriormente os resultados foram normalizados, para a comparação de medições com os dados do LACE.

Podemos verificar na Fig.3.1 os campos eletromagnéticos medidos em ambiente eletromagnético OATS comparados com os medidos em ambiente semi-anecóico.

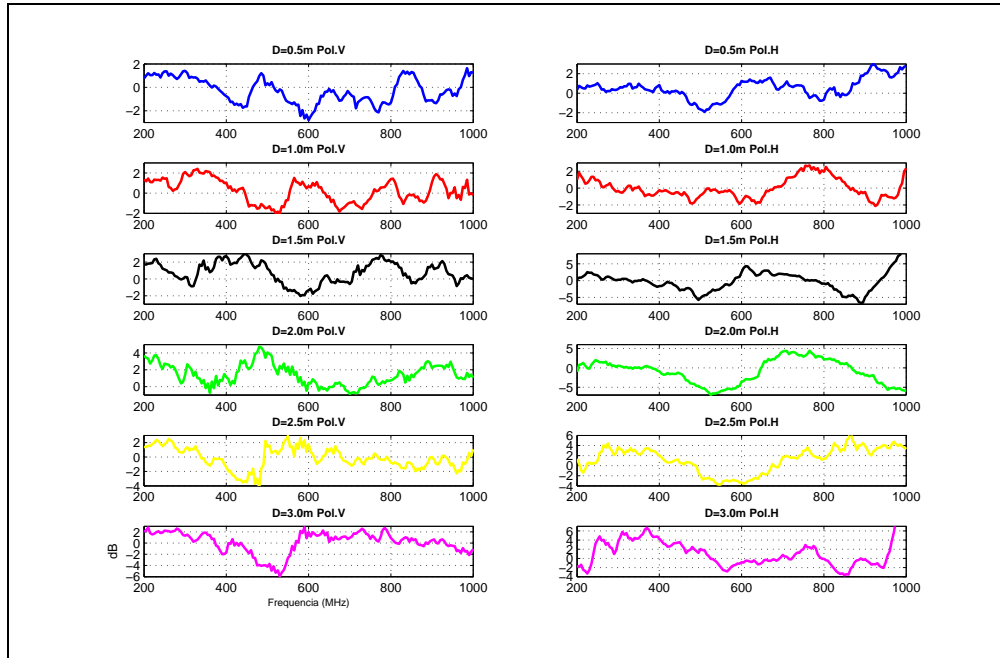
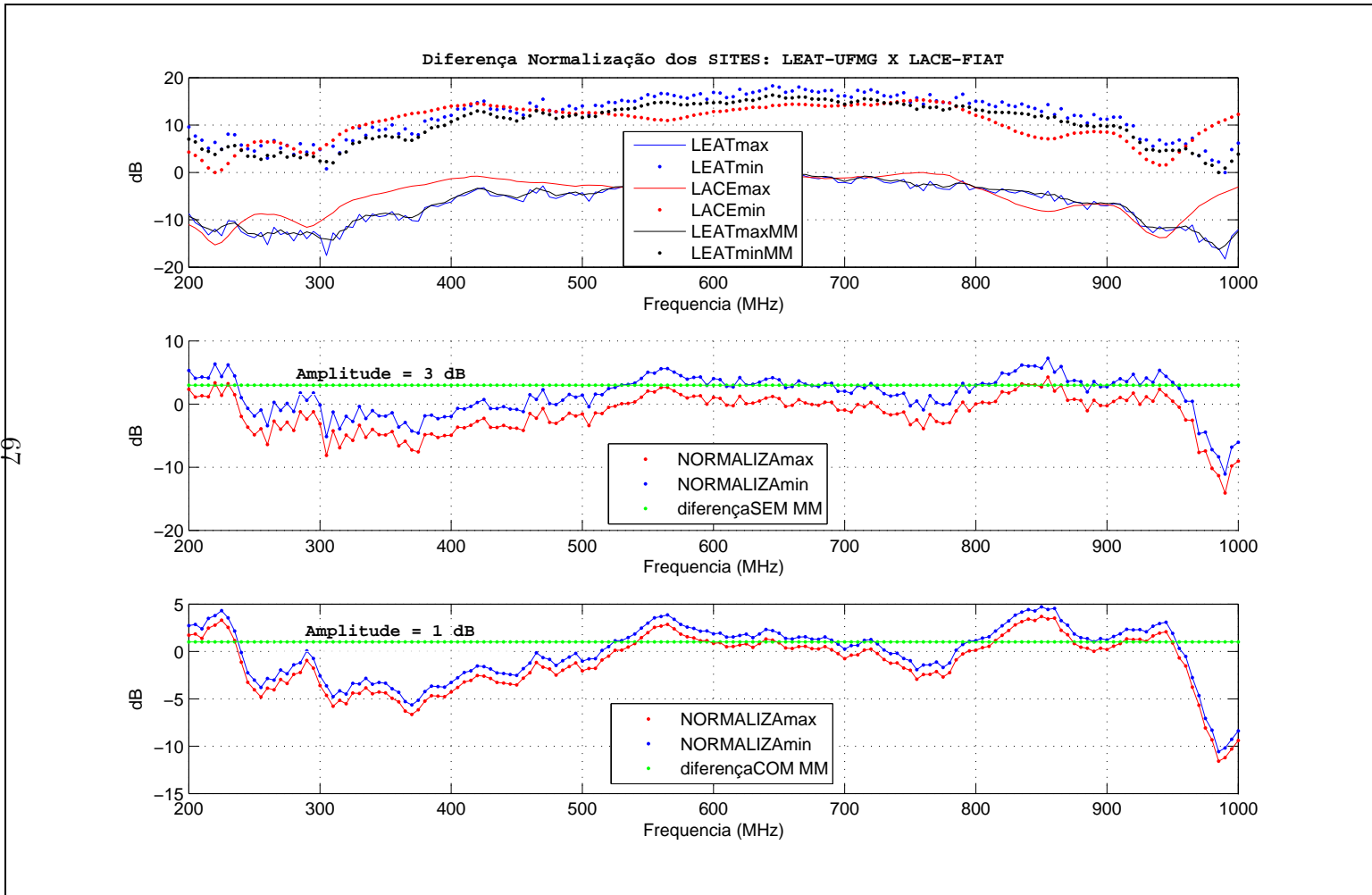


Figura 3.1: *Diferença entre Medições OATS e CSA*

A Fig.3.2 mostra o erro introduzido às medições realizadas em OATS devido a aplicação do filtro média móvel. Foram realizadas a normalização a partir do valor máximo do gráfico e a normalização a partir do valor mínimo. Após este processo foram comparados os resultados com e sem a aplicação do filtro de média móvel. O erro absoluto com a aplicação da média móvel foi de 1 dB e sem a aplicação da média móvel, de 3 dB.

Como os ruídos em algumas faixas apresentaram amplitudes elevadas em relação ao sinal aplicado, consideramos que a aplicação do filtro resultou na introdução de um erro matemático de até 2 dB, que não muda as análises realizadas, visto que apenas os ruídos indesejáveis foram eliminados.

Figura 3.2: Erro de Normalização



3.2 Veículos Simplificados

Para analisar a uniformidade da distribuição no interior de um veículo, seria necessário desenvolver um estudo aprofundado em todos os tipos de materiais que constituem o painel do veículo, visto que materiais dielétricos apresentam variações de permissividade e condutibilidade influenciadas pela frequência do campo neles aplicados.

Para reduzir o número de variáveis possíveis durante o mapeamento de campo no interior de veículos, foram construídos veículos simplificados, conforme mostram as Fig.3.3 e Fig.3.4. As dimensões máximas desse veículo foram extraídas de um veículo real.

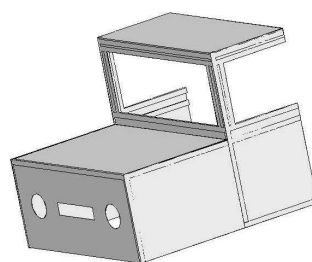
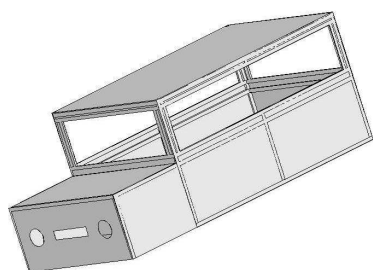


Figura 3.3: *Veículo Simplificado*

Figura 3.4: *Veículo Simpl. Cortado*

Tendo quantizado o erro entre as medições realizadas em OATS e CSA, foi realizado o mapeamento de campo no interior do veículo simplificado em que investigou-se as diferenças entre a distribuição de campos eletromagnéticos em 20 pontos de medição que representam o espaço onde é montado o painel do veículo, conforme é representado na Fig.3.5 e mostrado na Fig.3.6. Os experimentos realizados no LACE totalizaram 30 pontos por plano (polarizações vertical e horizontal). Os pontos coincidentes de medições realizadas no LACE e LEAT serão apresentados nessa seção.

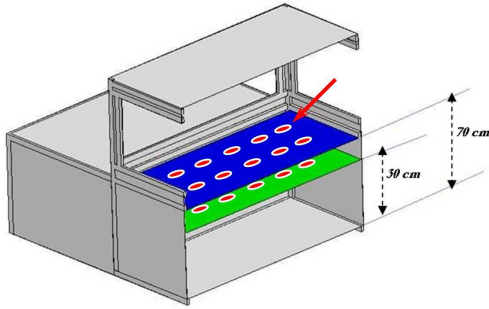


Figura 3.5: *Mapeamento Campo Veículo Simplificado: Esquema de Montagem*

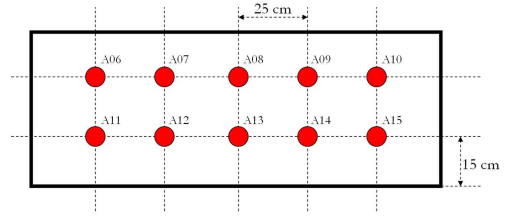


Figura 3.6: *Mapeamento Campo Veículo Simplificado: Fotografia da Montagem*

Nas figuras Fig.3.8 e Fig.3.7 são mostradas fotografias das montagens nos dois ambientes de medição.



Figura 3.7: *Medição veículo Simplificado: OATS LEAT*



Figura 3.8: *Medição veículo Simplificado: CSA LACE*

3.2.1 Resultados

Os gráficos apresentam os campos medidos no interior do veículo simplificado, levando em consideração a variação da potência dos experimentos, uma vez que a potência líquida utilizada para realização das medições no LEAT foi de 30W. No LACE a potência foi de 100W. Foi subtraído dos campo medidos no LACE o fator de 5,5 dB referente ao *decaimento* de campo como mostrado na Fig.3.9. Foram realizados 02 experimentos, com sensor de campo posicionado internamente ao veículo, com potências de 30W e depois repetido o procedimento para potência de excitação de 100W. A relação entre os campos com potências de excitação citadas foi de 5,5 dB, conforme indica o terceiro gráfico da Fig.3.9.

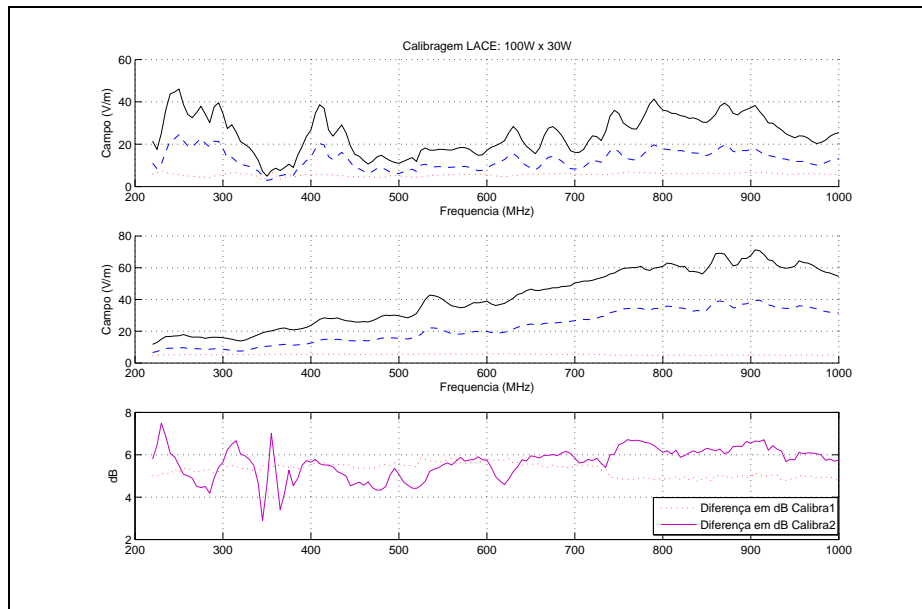


Figura 3.9: Calibragem: Potência x Campo Medido

Os gráficos apresentados na sequência dizem respeito aos pontos de medição inseridos na superfície do plano de medição como assinalado na Fig.3.6. Estas medições foram realizadas a uma distância de 70 cm (plano 'A') e 30 cm (plano 'B') do chão dos veículos. O primeiro gráfico mostra os campos medidos em (V/m) nos pontos de medição. Abaixo é mostrado a diferença em (dB) dos mesmos.

Serão apresentados os gráficos da medições dos pontos A06-A08-A10 e B06-B08-B10, sem comprometimento na análise do experimento na totalidade das medições realizadas.

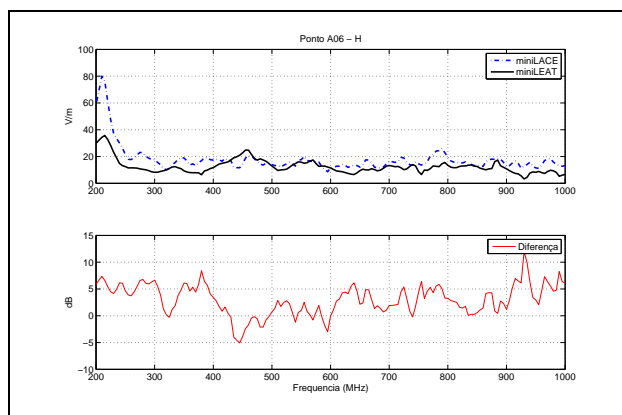


Figura 3.10: *Pt. Med. A6: Pol. H*

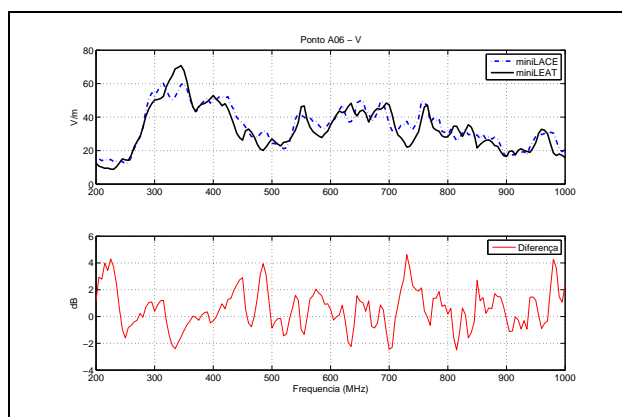


Figura 3.11: *Pt. Med. A6: Pol. V*

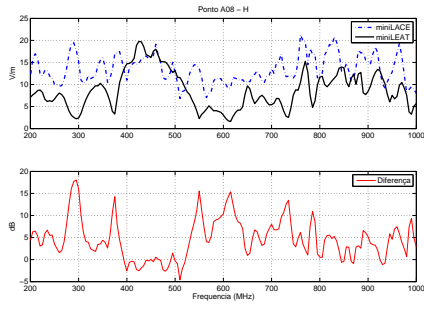


Figura 3.12: *Pt. Med. A8: Pol. H*

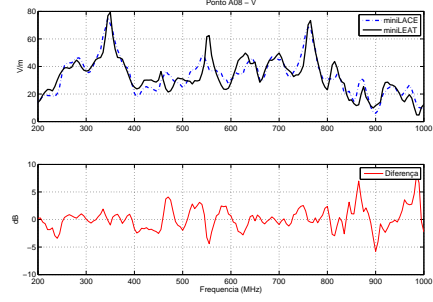


Figura 3.13: *Pt. Med. A8: Pol. V*

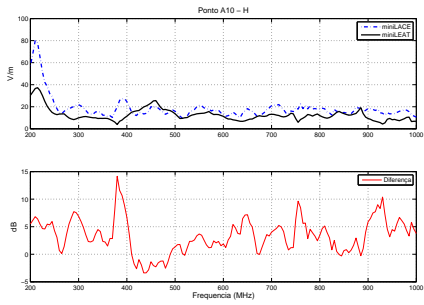


Figura 3.14: *Pt. Med. A10: Pol. H*

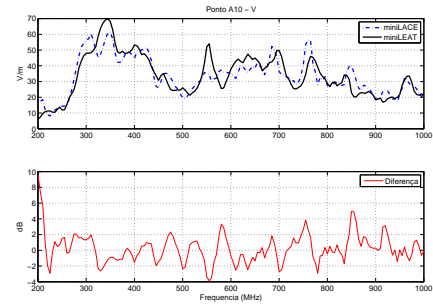


Figura 3.15: *Pt. Med. A10: Pol. V*

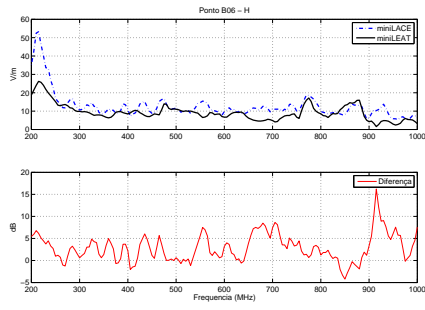


Figura 3.16: *Pt. Med. B6: Pol. H*

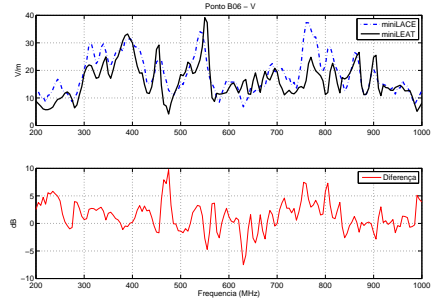


Figura 3.17: *Pt. Med. B6: Pol. V*

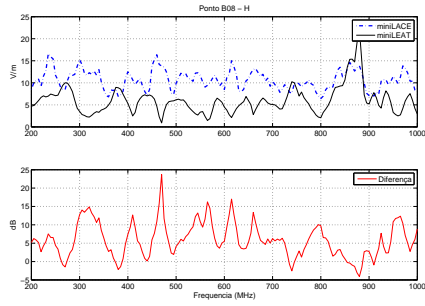


Figura 3.18: *Pt. Med. B8: Pol. H*

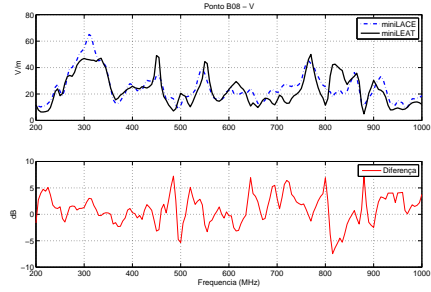


Figura 3.19: *Pt. Med. B8: Pol. V*

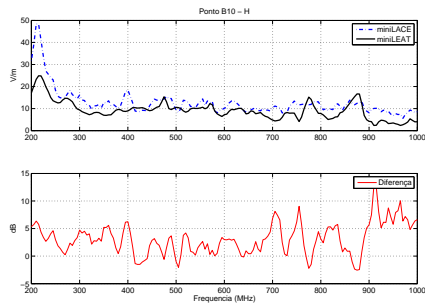


Figura 3.20: *Pt. Med. B10: Pol. H*

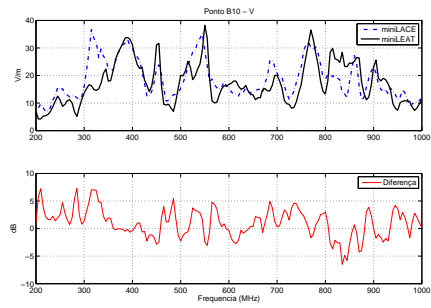


Figura 3.21: *Pt. Med. B10: Pol. V*

3.2.2 Conclusões

Com base nos resultados apresentados podemos concluir que existe uma forte relação entre os campos medidos em ambiente tipo OATS e CSA de pequeno porte. Os gráficos indicam uma variabilidade média entre os resultados obtidos nos dois ambientes em polarização horizontal e vertical menor que 3 dB. Os picos que ultrapassaram o valor de 5 dB nos experimentos podem ser atribuídos a pequenas diferenças no posicionamento dos sensores, próximos aos vértices do veículo simplificado.

Conforme mostrado na Fig.3.2, os erros tanto para a polarização horizontal quanto vertical correspondem aos erros verificados nos experimentos devido as diferenças construtivas dos ambientes eletromagnéticos de medição.

Na polarização vertical, observa-se que o erro médio entre todos os pontos de medição do veículo nas distâncias de 1,5m foi de 2 dB. Na polarização horizontal, o erro médio obtido nos 9 pontos de medição no interior do veículo foi menor que 3 dB.

Observando os resultados obtidos nos experimentos #1 e #2, a dispersão atribuída a incerteza na instalação dos sensores de campo é da mesma ordem de grandeza das diferenças verificadas nos experimentos com veículos simplificados.

Conclui-se portanto que as medições de campo são correlatas e o erro apresentado foi aproximadamente o mesmo que o erro de calibração dos ambientes.

3.3 Medições em Veículos Industrializados

Uma vez verificada a representatividade de medições realizadas em câmara semi-aneecóica e OATS para veículos simplificados, foram executados experimentos com o objetivo de verificar os efeitos de aproximação de veículos reais à antena, como mostrado nas Fig.3.22 e Fig.3.23. A potência de excitação do sistema foi mantida em 30W nos dois experimentos (a distância de 1,5m e 3,0m).



Figura 3.22: OATS: Medições a 1,5m Veiculo Real



Figura 3.23: OATS: Medições a 3,0m Veiculo Real

Podemos verificar na Fig.3.1 que para as distâncias de 1,5m e 3,0m existe uma diferença inserida nas medições devido as características construtivas dos ambientes eletromagnéticos de medições.

Como serão realizados experimentos para avaliar o efeito do afastamento do objeto de prova da antena, temos que isolar o efeito da difusão de campos eletromagnéticos nos ambientes CSA e OATS por apresentarem erros diferentes entre polarização vertical e horizontal.

A Fig.3.24 mostra a relação entre os valores de campos medidos para polarização vertical e horizontal a 1,5m e 3,0m de distância da abertura da antena no LEAT e no LACE. Podemos concluir que os erros inseridos nas medições, constante em 1,5 dB ($\pm 0,5$) decorrentes da realização dos experimentos em OATS não influirão na análise comparativa por apresentarem-se aproximadamente constantes em toda a faixa de frequência tanto para a polarização horizontal quanto vertical.

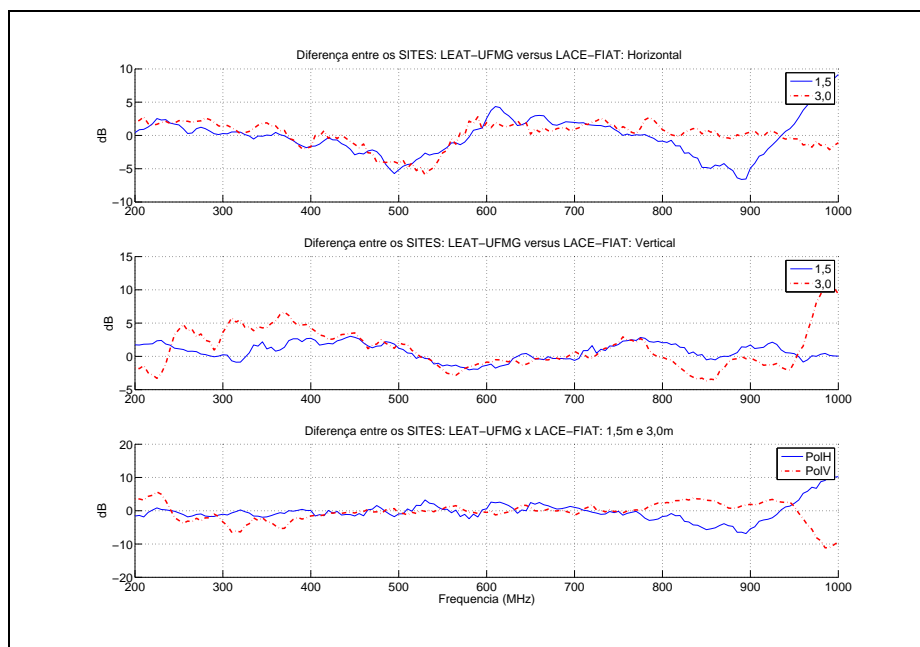


Figura 3.24: Erros Inseridos pelo 'Site': Pol. H e Pol. V

3.3.1 Resultados

Em ambiente OATS foi montado um veículo tipo 'FIAT-Palio' onde foram realizadas um conjunto de medição de 9 pontos diferentes no interior e periferia do painel do veículo, nas distâncias de 1,5m e 3,0m entre veículo e abertura da antena, como mostrado na Fig.3.25.

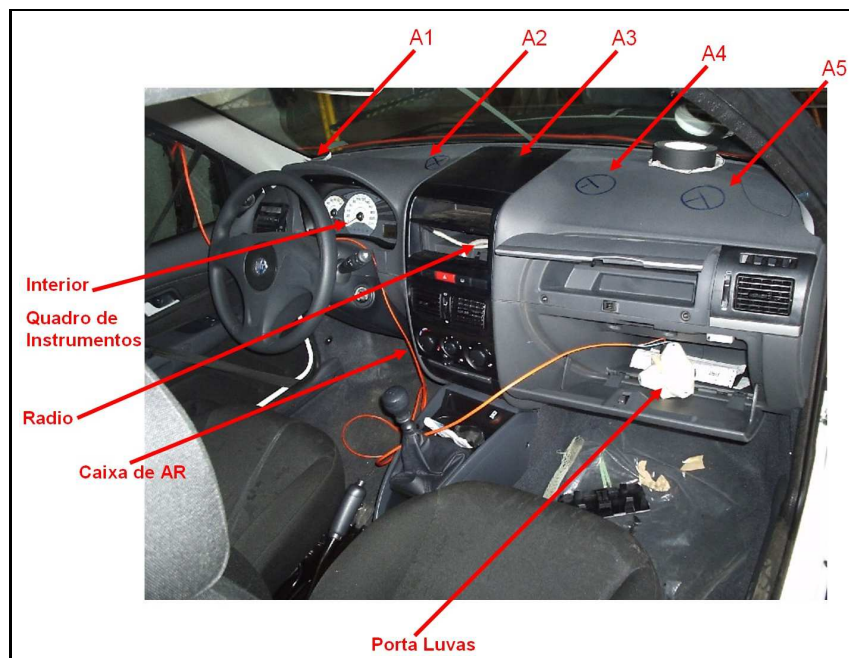


Figura 3.25: Pontos de Medição Interno Veículo

Os resultados apresentados mostram os campos medidos nos veículos a uma distância de 1,5 e 3,0m, em cada polarização. Um segundo gráfico que acompanha os resultados de medição mostra a diferença em dB dos campo medidos no gráfico precedente para cada ponto de medição. Da Fig.3.26 a Fig.3.31 são mostradas medições realizadas sob o painel do veículo, enquanto da Fig.3.32 a Fig.3.39 referem-se a medições realizadas na periferia de centrais eletrônicas.

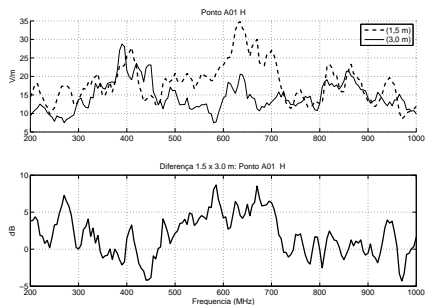


Figura 3.26: *Medições Veiculo: Pto. A1 Pol. H*

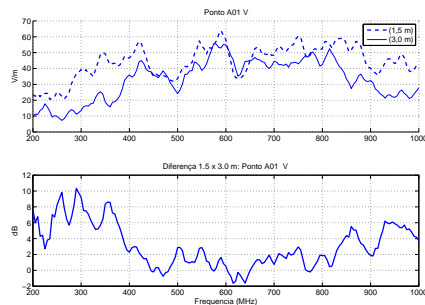


Figura 3.27: *Medições Veiculo: Pto. A1 Pol. V*

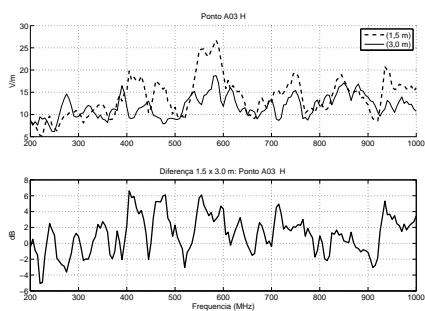


Figura 3.28: *Medições Veiculo: Pto. A3 Pol. H*

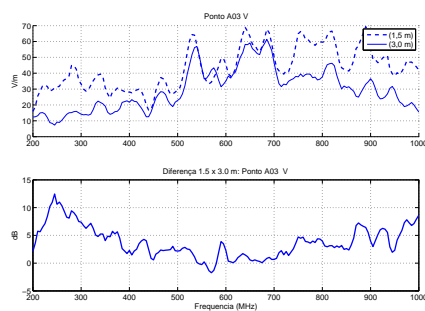


Figura 3.29: *Medições Veiculo: Pto. A3 Pol. V*

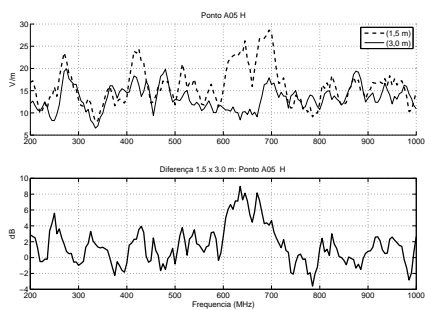


Figura 3.30: *Medições Veiculo: Pto. A5 Pol. H*

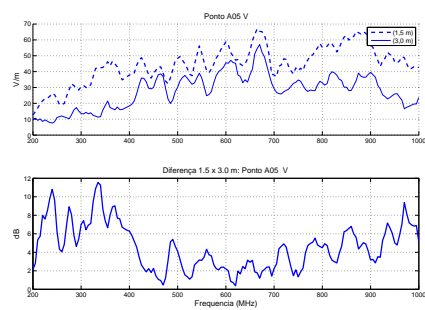


Figura 3.31: *Medições Veiculo: Pto. A5 Pol. V*

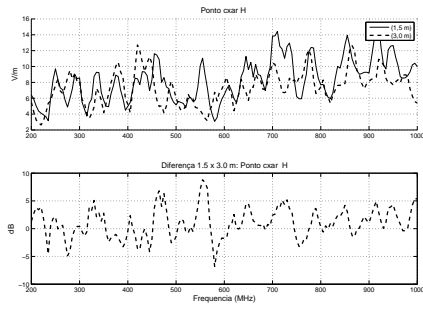


Figura 3.32: Pto. Med. Caixa de Ar: Pol.H

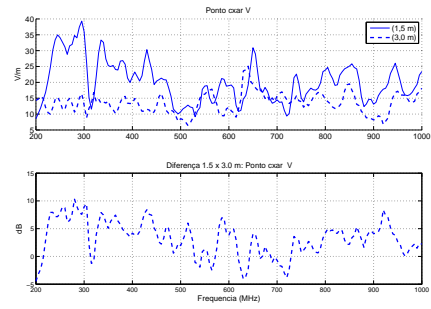


Figura 3.33: Pto. Med. Caixa de Ar: Pol.V

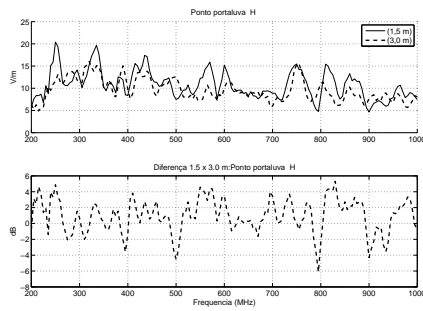


Figura 3.34: Pto. Med. Porta Luvas: Pol.H

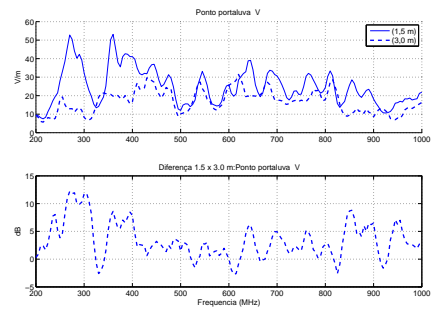


Figura 3.35: Pto. Med. Porta Luvas: Pol.V

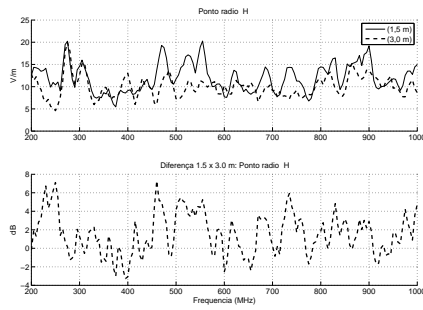


Figura 3.36: Pto. Med. Radio: Pol.H

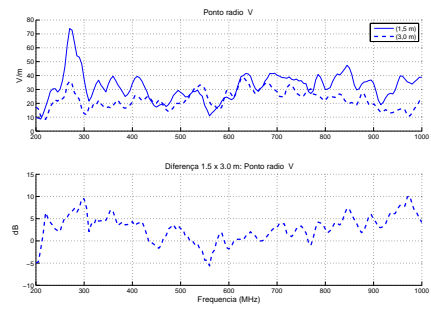


Figura 3.37: Pto. Med. Radio: Pol.V

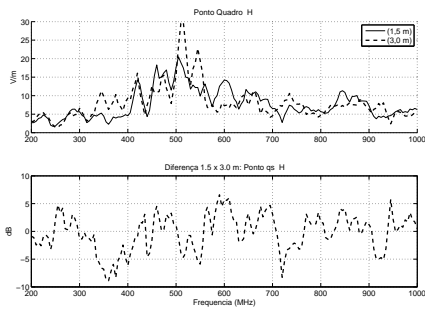


Figura 3.38: *Pto. Med. Quadro: Pol.H*

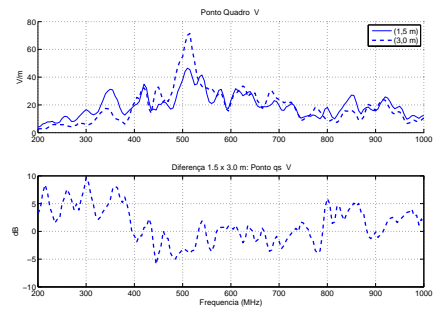


Figura 3.39: *Pto. Med. Quadro: Pol.V*

3.3.2 Conclusões

Verificamos que a variação dos valores medidos na maior parte dos pontos de medição de 200MHz a 1GHz nas distâncias de 1,5m e a 3,0m é de aproximadamente 4 dB (± 1 dB) para polarização horizontal e 5 dB (± 1 dB) para polarização vertical.

As diferenças de campos nas polarizações vertical e horizontal, levando em consideração as diferenças dos ambientes CSA e OATS avaliados são equivalentes aos valores de calibragem dos ambientes para as distâncias de 1,5m e 3,0m.

Esses fatores de aproximação serão levados em conta para a comparação entre veículos cortado e inteiro, para as distâncias de 1,5m e 3,0m nos ambientes CSA do LACE e CSA de ELASIS.

3.4 Definição do Fator de Similaridade: Veículo Inteiro e Cortado

O conjunto de medições a ser apresentado nessa seção, foi projetado para verificar o efeito no espalhamento dos campos eletromagnéticos no interior de um veículo quando esse for seccionado, conforme mostra a Fig.3.40 e Fig.3.41.

Foi realizado um mapeamento de campo como nas seções precedentes como mostra a Fig.3.25, com uma potência líquida de excitação constante em 30 W.

Foram traçados gráficos que indicam a diferença em dB dos campos, em um dado ponto de medição, resultado da razão entre os valores medidos no veículo completo divididos pelos valores do campo medidos em veículo cortado em cada frequência de 200MHz a 1GHz, para veículos que distavam 1,5m e 3,0m da abertura da antena.

Acrescido a esses gráficos, foi realizado uma interpolação linear, em cada curva, apresentadas em um gráfico separado abaixo, que indica a tendência e a margem de variabilidade dos experimentos.

Esse procedimento foi realizado para conferir que, a proximidade do objeto espalhador à antena não influenciaria na comparação entre veículo cortado e veículo inteiro.



Figura 3.40: *Veículo Inteiro*



Figura 3.41: *Veículo Cortado*

3.4.1 Resultados

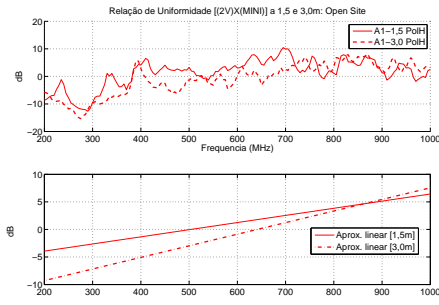


Figura 3.42: Pto. A1 Pol.H

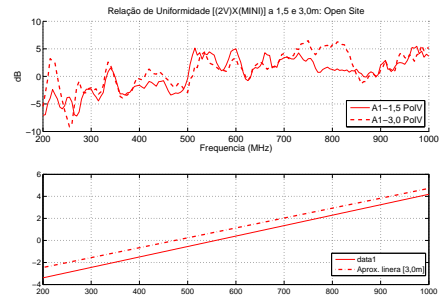


Figura 3.43: Pto. A1 Pol.V

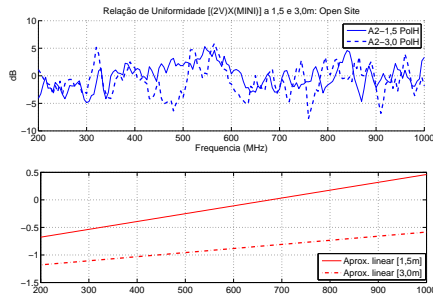


Figura 3.44: Pto. A2 Pol.H

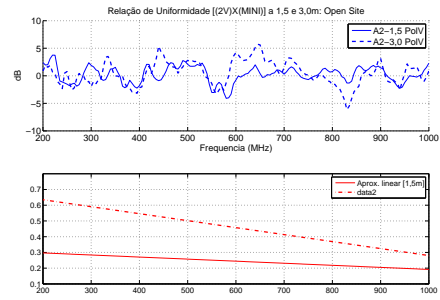


Figura 3.45: Pto. A2 Pol.V

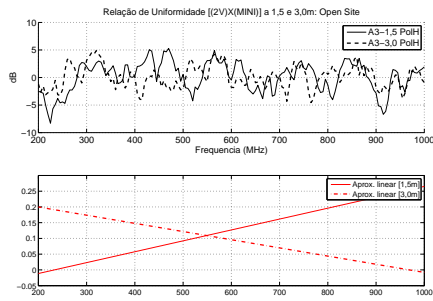


Figura 3.46: Pto. A3 Pol.H

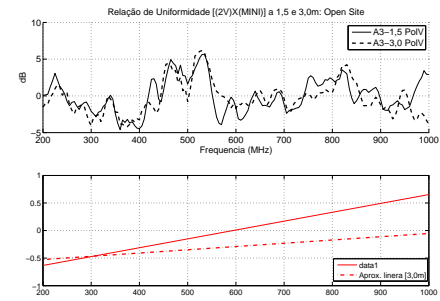


Figura 3.47: Pto. A3 Pol.V

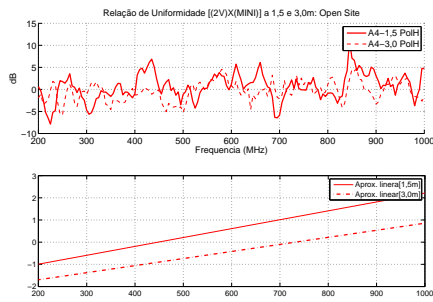


Figura 3.48: *Pto. A4 Pol.H*

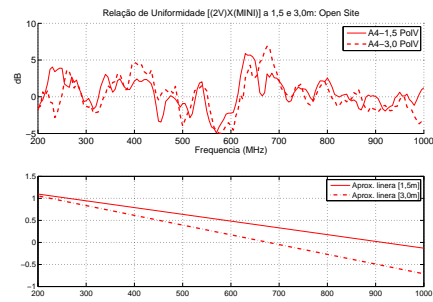


Figura 3.49: *Pto. A4 Pol.V*

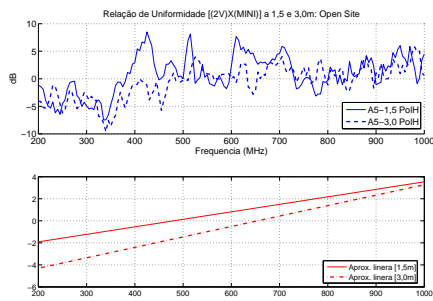


Figura 3.50: *Pto. A5 Pol.H*

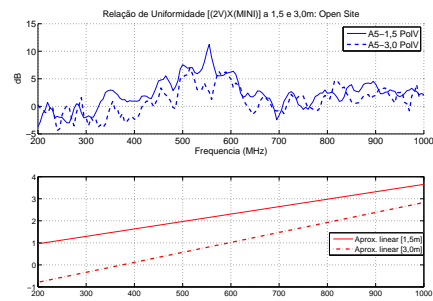


Figura 3.51: *Pto. A5 Pol.V*

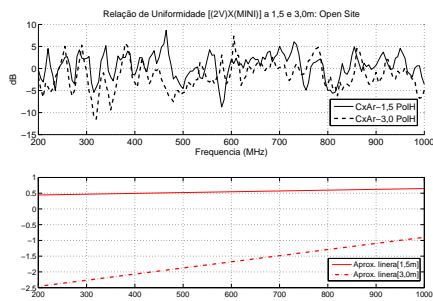


Figura 3.52: *Pto. CxAr Pol.H*

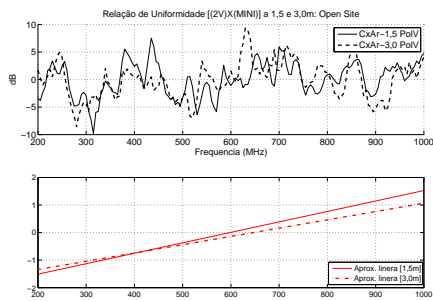


Figura 3.53: *Pto. CxAr Pol.V*

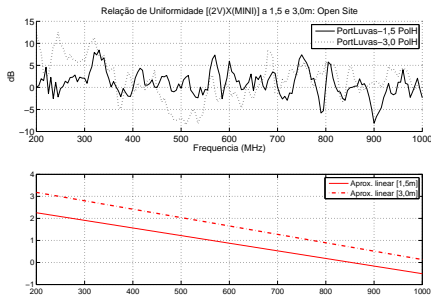


Figura 3.54: Pto. PL Pol.H

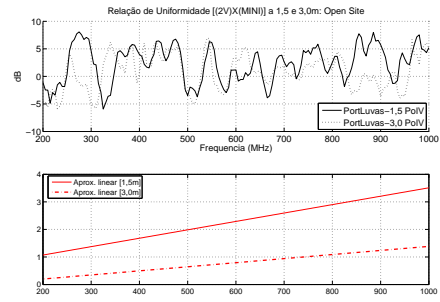


Figura 3.55: Pto. PL Pol.V

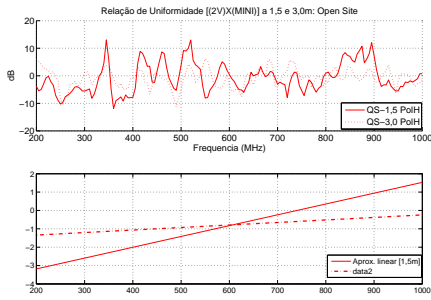


Figura 3.56: Pto. QS Pol.H

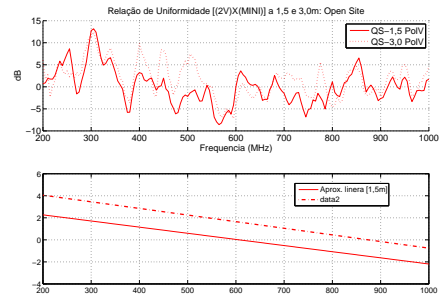


Figura 3.57: Pto. QS Pol.V

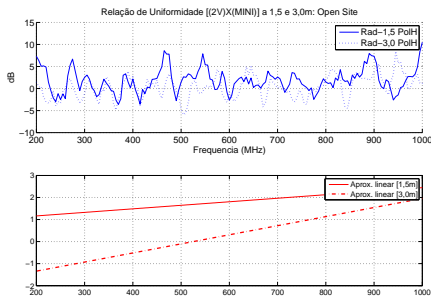


Figura 3.58: Pto. Rad Pol.H

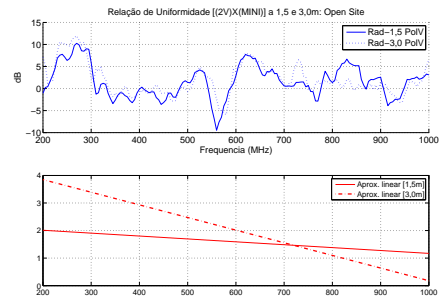


Figura 3.59: Pto. Rad Pol.V

3.4.2 Conclusões

Através da análise dos gráficos apresentados nessa seção, podemos observar que, embora as medições fossem realizadas em distâncias diferentes a relação de aproximação do veículo da antena não interferiu na análise do efeito do corte do veículo.

Podemos observar nos gráficos das Fig.3.43, Fig.3.42, Fig.3.50 e Fig.3.51, onde ocorrem as maiores diferenças entre a relação $[Carro\ Inteiro]/x/[Carro\ Cortado]$ que a secção do veículo influiu substancialmente na uniformidade dos campos medidos no veículo cortado. Se observarmos a região onde procede-se a secção, perceberemos que a coluna lateral de encaixe do vidro "pára-brisa" foi removida. Essa coluna constitui uma abertura em que há fluxo de corrente induzida. Os pontos de medição A1 e A5 são situados próximos a coluna. Daí, a grande variação percebida nos resultados referentes a esses pontos de medição.

Quando observamos os gráficos das Fig.3.45, Fig.3.44, Fig.3.46, Fig.3.47, Fig.3.49, e Fig.3.48 percebemos haver correlação entre os valores medidos tanto a distância de 3,0m quanto a 1,5m. Observamos também, que as diferenças entre os campos medidos nesses pontos estão dentro da faixa de erro inserido pelas diferenças construtivas dos ambientes eletromagnéticos de medição, exceto para a faixa de frequência de 400 a 600 MHz, que apresentam variação em média 1 dB do valor inserido pelo ambiente eletromagnético.

Observamos haver diferenças significativas entre a média de distribuição de campo entre os vários pontos de medição, em faixas de frequência distintas. Essa análise indica a impossibilidade de se haver uma correlação numérica constante em toda a faixa, para a configuração proposta, o que a princípio inviabilizaria a realização da prova com veículos cortados, por apresentar solicitações eletromagnéticas diferentes em diferentes regiões do interior do veículo.

3.5 Mini “Site”

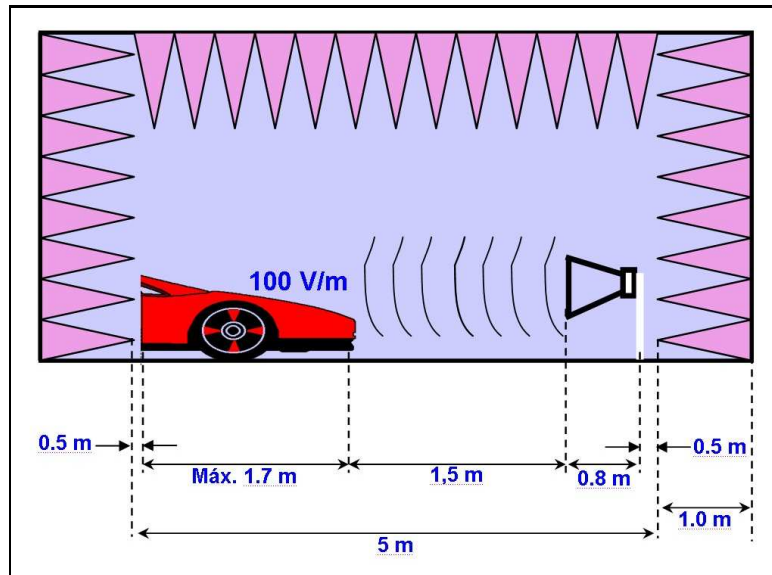


Figura 3.60: Veículo Cortado: Escopo Técnico do Projeto CNPq 550525-2003/3

A Fig.1.4 esquematiza as dimensões do teste de imunidade radiada com veículos cortados.

O experimento intitulado “*Mini Site*”, que dá nome a proposta de “Correlação entre Campos Eletromagnéticos gerados em Câmara Semi-aneecóica de Grande porte e dimensões Reduzidas” trata da comparação entre os campos eletromagnéticos medidos no interior de um veículo em câmara semi-aneecóica de grande porte, construída em Nápoles, Itália, no instituto “*Elasis*” de pesquisa da FIAT e o mapeamento da distribuição de campos no interior do mesmo veículo, porém seccionado, medidos na câmara semi-aneecóica de pequeno porte construída no LACE da FIAT em Betim, conforme ilustram as Fig.3.62 e Fig.3.61 abaixo:

Esse experimento contou com a adição de uma variável: A antena (tipo log-periódica) usada na prova de imunidade a campos radiados ISO11451-2 em Elasis é diferente da antena estudada no projeto nos experimentos passados.



Figura 3.61: *Pto. Rad Pol.H*



Figura 3.62: *Pto. Rad Pol.H*

Os campos eletromagnéticos oriundos deste sistema podem apresentar uma distribuição completamente diferente do sistema já estudado em seções anteriores desse trabalho.

Embora verificamos que ambas as configuração de ambiente cumprem os requisitos mínimos estabelecidos na norma citada, os resultados apresentados demonstraram diferenças significativas a serem tratadas no sub-item “Conclusão” dessa seção.

3.5.1 Metodologia de Prova

Uma vez que o sistema de geração de campos eletromagnéticos usado para a realização da prova ISO11451-2 na CSA de Elasis é diferente do sistema do LACE, a metodologia de prova adotada anteriormente que se baseava no controle da potência líquida gerada pelo sistema não pode ser adotada pela pouca disponibilidade de tempo para que realizássemos a prova na Itália. Embora que nos foi disponibilizado os dados técnicos dos amplificadores, antena e acoplador direcional utilizado em testes de imunidade na CSA em Elasis, ainda assim as perdas nas conexões elétricas do sistema não eram conhecidas. A solução para que o experimento fosse viabilizado, foi realizarmos a correlação entre o mapeamento de campo no interior do veículo, conforme mostrado na Fig.3.25, com exceção dos pontos A2 e A4 que foram excluídos pela indisponibilidade de canais do *Field Monitor* do laboratório de EMC de Elasis, com base no procedimento da calibração proposto pela ISO11451-2.

Os sete pontos de medição mapeados no interior do veículo, mais o sensor inserido no ponto de calibragem do veículo, conforme Fig.A.6, e medido um campo constante na faixa de 200MHz a 1GHz de 100V/m.

No LACE, houveram pontos em que não foi possível atingir o nível de campo de 100V/m, entre as frequências de 200 e 300 MHz, polarização horizontal, por essa razão, apresentaremos nos resultados, um valor de campo normalizado que foi definido pela razão entre a intensidade de campo medido no interior do veículo e o valor de calibragem do ambiente eletromagnético que para Elasis foi constante em 100V/m em toda a faixa.

3.5.2 Resultados

Os gráficos apresentados nessa seção são constituídos de três curvas:

1. Relação entre o campo eletromagnético medido no interior do veículo inteiro em câmara semi-aneecóica convencional e o campo medido de calibragem do sistema conforme preconizado pela norma ISO-11451-2 (em dB);
2. Relação entre o campo eletromagnético medido no interior do veículo seccionado em câmara semi-aneecóica de pequeno porte e o campo medido de calibragem do sistema conforme preconizado pela norma ISO-11451-2 (em dB);
3. Diferença em dB da relação entre campo de calibragem e campo medido no interior dos veículos em teste, em câmara semi-aneecóica de convencional e câmara semi-aneecóica de pequeno porte.

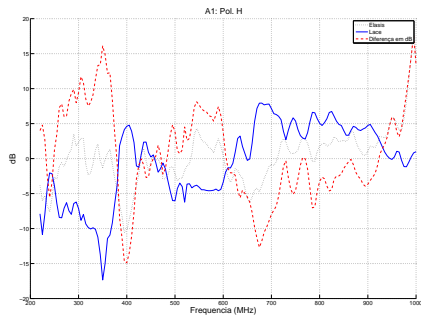


Figura 3.63: *Pto. A1 Pol.H*

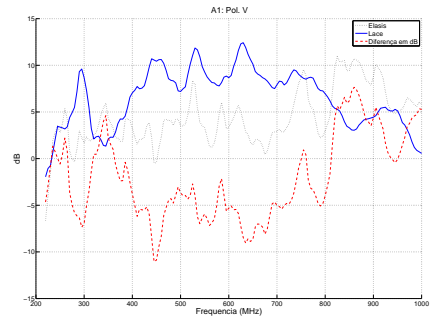


Figura 3.64: *Pto. A1 Pol.V*

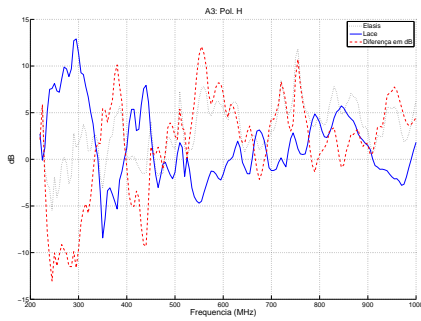


Figura 3.65: *Pto. A3 Pol.H*

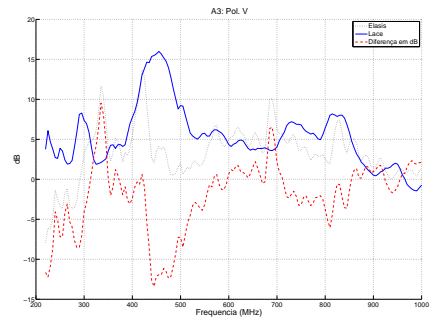


Figura 3.66: *Pto. A3 Pol.V*

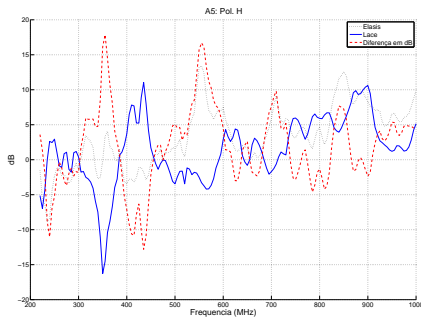


Figura 3.67: *Pto. A5 Pol.H*

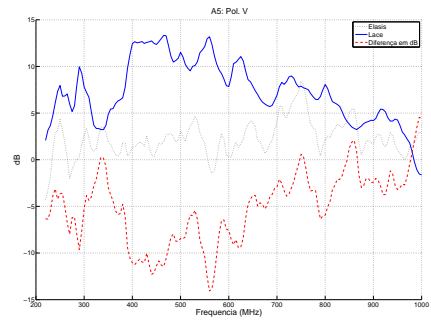


Figura 3.68: *Pto. A5 Pol.V*

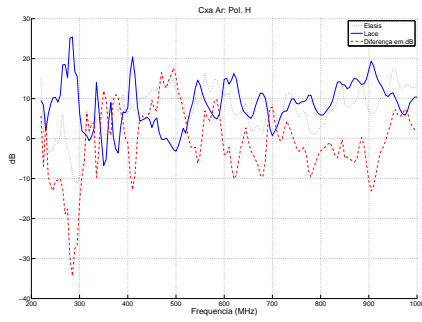


Figura 3.69: Pto. CxAr Pol.H

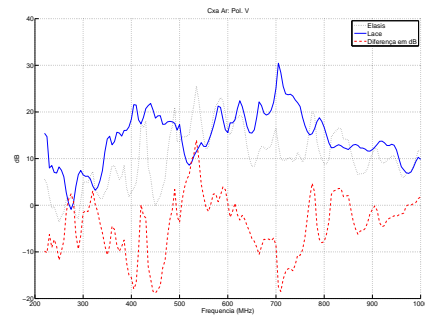


Figura 3.70: Pto. CxAr Pol.V

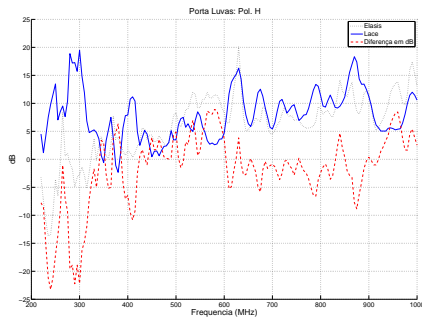


Figura 3.71: Pto. PL Pol.H

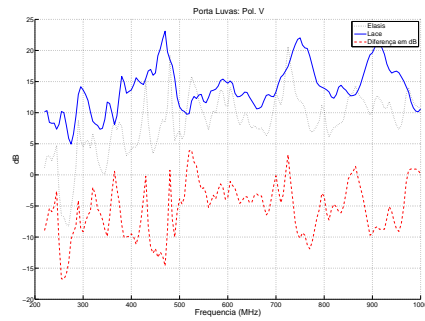


Figura 3.72: Pto. PL Pol.V

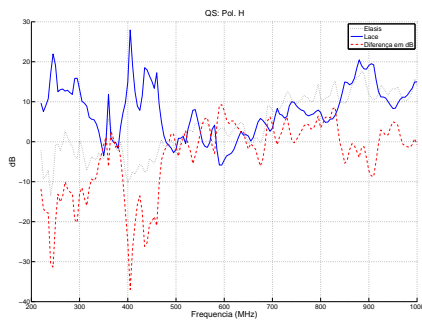


Figura 3.73: Pto. QS Pol.H

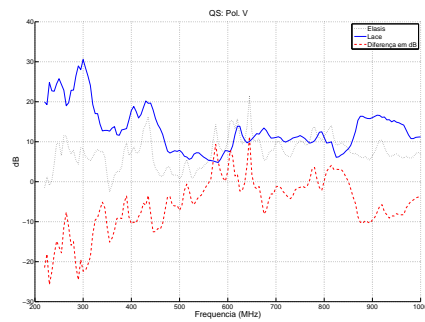


Figura 3.74: Pto. QS Pol.V

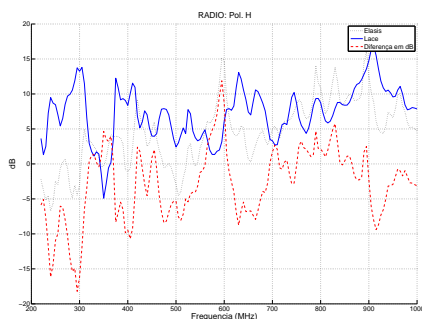


Figura 3.75: *Pto. Rad Pol.H*

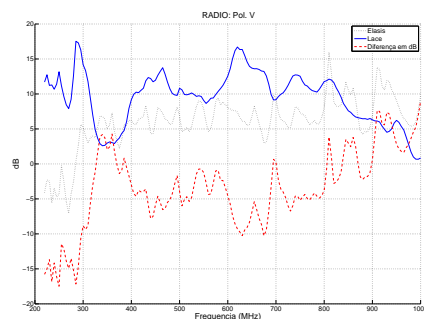


Figura 3.76: *Pto. Rad Pol.V*

3.5.3 Conclusões

Como pode ser observado nos gráficos apresentados não há uma correlação linear em toda a faixa de frequência de exame. As Fig.3.66; Fig.3.70; Fig.3.71 apresentam de maneira sutil, uma tendência entre as medições realizadas nos ambientes eletromagnéticos descritos. Os campos medidos nos pontos A1 e A5, tanto em polarização horizontal quanto vertical, apresentaram as maiores discrepâncias entre os testes em ambiente convencional e reduzido, demonstram que a secção do veículo foi demasiada, uma vez que as colunas laterais de sustentação do “pára-brisas” poderia ser mantida.

Não foi verificado um padrão linear, ao longo do espectro de frequência, dentre todos os pontos de medição analisados.

Identificamos ainda uma menor representatividade desses resultados definida pela imprecisão do processo de calibragem adotado. O sensor de referência de campo usado nas medições realizadas na CSA em Elasis, foi posicionado acima das palhetas “pára-brisas” exatamente conforme o padrão ISO11451-2. Já no veículo seccionado, como não havia o vidro “pára-brisa” o sensor de calibração foi posicionado em um ponto próximo ao ponto de calibragem adotado em Elasis.

No LACE, a antena foi posicionada paralelamente ao plano de referência do ambiente, em outras palavras, o ângulo de incidência da antena foi de $\alpha=0^\circ$ para o experimento realizado em câmara semi-anecóica de pequeno porte e de $\alpha=15^\circ$ para os experimentos realizados em Elasis.

Capítulo 4

Conclusões e propostas de continuidade

Nesse trabalho, o ensaio de susceptibilidade eletromagnética aplicado a veículos, foi analisado a partir dos princípios elementares que definem a entidade de campo (*essência manifesta, totalidade*) proveniente da associação da energia entregue ao espedo do sistema de excitação, da características do ambiente eletromagnético e das condições de espalhamento no interior do veículo.

Foram realizados aproximadamente 2.000 ensaios divididos em três grupos de medições: **i:** levantamento das características dos campos eletromagnéticos no intervalo de frequência de 200 a 1.000 MHz, **ii:** caracterização da distribuição de campos eletromagnéticos no interior de modelos de veículos simplificados; **iii:** caracterização da distribuição de campos eletromagnéticos no interior de veículos “reais”.

As técnicas de medição de campos eletromagnéticos em sistemas de imunidade disponíveis na literatura foram estudadas e os equipamentos usualmente utilizados nesses ensaios foram resumidamente descritos.

A observação dos resultados dos experimentais realizados demonstrou que, em termos de distribuição de campos eletromagnéticos no interior de veículos, há correlação entre as medições realizadas, seja em veículos simplificados que industrializados nas distâncias de 1,5m e 3,0m entre antena e veículo.

Conforme mencionado na seção 3.2 e confirmado através dos experimentos citados na seção 3.3, a redução da distância entre veículos e antena de medição, para a faixa de frequência analisada não resultará em descaracterização da prova, o que configura a contribuição inovadora dessa dissertação.

Essa contribuição, em conjunto com as contribuições dos colegas Ricardo, Roginelle e os colegas da PUC-Minas, que analisaram o problema do acoplamento entre veículo e antena, e a distribuição de campos eletromagnéticos no interior do compartimento do motor dos veículos, viabilizam o projeto de câmaras semi-aneecóicas de dimensões reduzidas, em relação às convencionais, criando assim a possibilidade de racionalização na compra de equipamentos associada a redução da potência (por aproximação do objeto de prova à antena) além da redução do custo de investimento para a construção da câmara (na ordem de 6 vezes do custo necessário para a construção de laboratórios).

Através da metodologia desenvolvida foi possível isolar, a cada experimento, uma única variável e assim estabelecer a influência do corte do veículo na realização da prova em câmara semi-aneecóica de pequeno porte.

Os erros verificados nos experimentos realizados na configuração propostas, indicam a impossibilidade numérica de se estabelecer uma correlação entre a distribuição de campos eletromagnéticos no interior de um veículo inteiro e cortado.

Como foi descrito na seção 3.4 a impossibilidade de haver um fator de similaridade que apresente valores constantes de atenuação/amplificação de campos eletromagnéticos para pontos de medições diferentes no interior do veículo, impossibilita o ajuste da excitação do sistema, uma vez que o acréscimo ou decréscimo da potência de controle do sistema, para uma dada frequência, resultará em solicitações eletromagnéticas diferentes em locais diferentes no interior do veículo.

Porém, o experimento ‘MINI-SITE’ realizado no LACE apresentou variações na calibração do sistema de monitoramento de campo. A correção dessas variações através da inclinação da antena emissora, reposicionamento do sensor na calibração, ajuste na secção do veículo (conservando a coluna ‘A’) e mantendo-se as dimensões do pavimento, podem resultar em uma distribuição de campo mais próxima daquela verificada, quando um veículo for submetido a prova de imunidade radiada em CSA de dimensões normalizadas.

Observando os gráficos da seção 3.5, podemos verificar que as maiores diferenças entre os campos medidos em veículo inteiro/seccionado em ambiente CSA de grande/pequeno porte, ocorre em uma faixa de frequência compreendida entre 200 e 400 MHz, polarização horizontal.

O trabalho de iniciação científica do discente Cláudio Henrique G dos Santos, do CEFET-MG, que realizou o “modelamento” computacional da antena ETS 3106 usada nos experimentos, indicou que a faixa de menor correspondência entre os dados do fabricante e as simulações foi justamente na mesma faixa de 200 a 400 MHz.

Portanto, podemos concluir que para efeitos de pré-avaliação, adotadas as ações propostas, é possível realizar a prova de imunidade a campos eletromagnéticos radiados em CSA de pequeno porte, na faixa de frequência de 200 MHz a 1,0 GHz, porém uma avaliação final de projeto, deverá ser realizada em uma CSA de dimensões normalizadas.

Como proposta de continuidade apresentamos:

(i): Uma vez verificada a possibilidade de otimização na construção de câmaras semi-aneóicas, dada pelos resultados encontrados nas medições de aproximação de veículos à antena e o baixo acoplamento entre veículo e antena, apresentamos como proposta de continuidade o dimensionamento e construção de uma câmara semi-aneóica de dimensões mínimas para a garantia dos critérios descritos na norma NBR-ISO11451-2.

(ii): As simulações computacionais descritas no projeto CNPq 550525-2003-3, foram realizadas em veículos simplificados. Um próximo passo pode ser a importação e simulação computacional de veículo industrializados.

(iii): Observamos, através do mapeamento de campo em veículos inteiros e seccionados, que a influência do volume dos veículos inteiros provoca o surgimento de campos de elevadas amplitudes em faixas específicas de frequência em seu interior. Com o uso de técnicas computacionais, propomos o cálculo e a adoção de refletores metálicos, posicionados na parte posterior dos veículos seccionados, que resultem, em uma distribuição de campos equivalente, para faixa de frequências específicas, a distribuição em veículos inteiros.

Referências Bibliográficas

- [ABN05] ABNT. Veículo rodoviários automotores-método de ensaio veicular para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita: Parte 1: Princípios gerais e terminologia. Technical Report 22, ABNT, Brasil, 2005.
- [ABN06] ABNT. Nbr-iso 11451-1: Veículo rodoviários automotores-método de ensaio veicular para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita: Parte 2: Fontes de radiação externas ao veículo. Technical report, Federal Communications Commission, Brasil, 2006.
- [Adr07] R. L. Adriano. *Modelagem computacional aplicada à solução de problemas de interação eletromagnética*. PhD thesis, UFMG, abril 2007.
- [Ans06] Ansoft. High frequency simulator system , ansoft corporation home page. www.ansoft.com/products/hf/hfss/, 2006.
- [Bal88] C. Balanis. *Antenna Handbook: Theory, Applications and desing*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1988.
- [Bal89] C. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley and Sons, New York, 1989.
- [Bal97] C. Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley and Sons, New York, 1997.
- [C6396] C63. American national standard for electromagnetic noise and field strength instrumentation, 10 khz to 40 ghz - specifications - description. Technical report, American National Standard Institute, New York, 1996.

- [C6301] C63. American national standard for method of measurement of radio-noise emissions from low-voltage electrical and electronic equipment in the range of 9 kHz to 40 GHz. Technical report, American National Standard Institute, New York, June 2001.
- [CIS05] CISPR. Limits and methods of measurement of radio interference characteristic of information technology equipment. Technical Report 22, CISPR, Switzerland, 2005.
- [DI57] R. DuHamel and D. Isbell. Broadband logarithmically periodic antenna structures. In IRE, editor, *National Convention Record*, volume 1, pages 119–128, 1957.
- [EL06] ETS-Lindgren. Ets-lindgren home page. <http://www.ets-lindgren.com/>, 2006.
- [IB92] N. Ida and J. Bastos. *Electromagnetics and Calculation of Fields*. Springer-Verlag, New York, 1992.
- [INT02] INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE. Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on board vehicles, boats, and on devices limits and methods of measurement. Technical Report 2, CISPR, Switzerland, 2002.
- [INT11] INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus measuring apparatus. Technical Report 1, CISPR, Switzerland, 2003-11.
- [Isb60] D. Isbell. Log periodic dipole arrays. *IRS Trans. Antennas Prop.*, 8:260–267, 1960.
- [ISO95] ISO. 11452 road vehicles - electrical disturbance by narrowband radiated electromagnetic energy - component test methods. Technical report, International Organization Standardization, Switzerland, 1995.
- [ISO01] ISO. 11451 road vehicles - vehicle test method for electrical disturbance from narrowband radiated electromagnetic energy. Technical

- report, International Organization Standardization, Switzerland, 2001.
- [J1175] SAE J1113. Electromagnetic susceptibility measurement procedures for vehicle components (except aircraft). Technical report, SAE, 1975.
- [kF99] J. kraus and D. Fleisch. *Electromagnetics: with applications*. WCB/McGraw-Hill, Boston, 1999.
- [Lov76] A. Love. *Electromagnetic Horn Antenna*. IEEE Press, New York, 1976.
- [Pau92] C. R. Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Wiley series in microwave and optical engineering. John Wiley and Sons, New York, USA, 1992.
- [Pau06] C. R. Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility, 2th edition*. Wiley series in microwave and optical engineering. John Wiley and Sons, New York, USA, 2006.
- [Pir05] R. S. Pires. Investigação de uma nova metodologia para ensaios de suscetibilidade eletromagnética em veículos automotivos. Exame de Qualificação de Douorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Stembro 2005.
- [San02] G. Santos. Considerações do ambiente eletromagnético urbano na análise de interferências em veículos automotores. Master's thesis, Universidade de São Paulo, 2002.

Apêndice A

Norma NBR ISO11451: Partes 1 e 2

A família de norma NBR-ISO11451 intitulada “Veículos rodoviários automotores - Métodos de ensaio veicular para distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita”, consiste nas seguintes partes:

- Parte 1: Princípios gerais e terminologia;
- Parte 2: Fontes de radiação fora do veículo;
- Parte 3: Simulação do transmissor embarcado;
- Parte 4: Injeção de corrente (BCI);

Para atingir os objetivos dessa dissertação, nos ateremos às partes 1 e 2 dessa família de normas pertinentes às provas de imunidade a campos eletromagnéticos radiados.

O Objetivo da parte 1 da norma NBR ISO 11451, é o de especificar condições gerais, definir termos, prover diretrizes práticas e estabelecer os princípios básicos para ensaios veiculares utilizados em outras partes da NBR ISO 11451 para determinar a imunidade de veículos de passeio e comerciais quanto a distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita, a despeito do sistema de propulsão do veículo (por exemplo, motor à combustão, diesel, eletrônico).

A parte 2 da NBR ISO 11451, especifica um método de ensaio para determinar a imunidade de veículos de passeio e comerciais quanto a distúrbios elétricos causados por fontes de radiação fora do veículo, a despeito do sistema de propulsão do veículo (por exemplo, motor à combustão, diesel, eletrônico). Esta parte da NBR ISO 11451 também pode ser facilmente aplicada a outros tipos de veículos.

Os distúrbios eletromagnéticos considerados estão limitados aos campos eletromagnéticos em banda estreita.

A.0.4 Termos e definições

Para os efeitos da Norma NBR ISO 11451, aplicam-se os termos e definições seguintes:

1 compartimento blindado (com absorvedores): Ambiente protegido e blindado com material absorvente para sinais de rádiofrequência em seu teto e paredes internas.

Obs.: A prática comum é para o ambiente ter um piso metálico, porém material absorvente pode também ser utilizado sobre o piso.

2 modulação da amplitude (AM): Processo pelo qual a amplitude de uma onda portadora é variada seguindo uma lei especificada, resultando em um sinal AM.

3 corrente injetada (*bulk current*): Quantidade total de corrente de modo comum em um chicote de fiação.

4 ponto de compressão: Nível do sinal de entrada no qual o sistema de medição torna-se não-linear, quando o valor de saída desviar-se do valor dado por um sistema linear ideal.

5 acoplamento: Meio ou dispositivo para transferência de potência entre sistemas.

Obs.: Adaptada da IEC 60050-726.

6 ponta de prova para injeção de corrente (*current injection probe*): Dispositivo para injeção da corrente em um condutor, sem inter-

rompê-lo ou sem introduzir impedância significativa nos circuitos associados.

7 ponta de prova para medição de corrente (current measuring probe): Dispositivo para medição da corrente em um condutor, sem interrompê-lo ou sem introduzir impedância significativa nos circuitos associados. (IEC 60050-161)

8 degradação (do desempenho): Perda no desempenho pretendido operacional de qualquer dispositivo, equipamento ou sistema.

Obs.: O termo *degradação* pode aplicar-se para falhas temporárias ou permanentes. (IEC 60050-161)

9 acoplador bidirecional: Dispositivo constituído por duas linhas transmissoras acopladas de tal maneira que quando uma onda atravessa uma das linhas, irá induzir uma onda na segunda linha, o sentido de propagação depende da primeira onda.

Obs.: Adaptada da IEC 60050-726.

10 compatibilidade eletromagnética (EMC): Capacidade do equipamento ou sistema de funcionar satisfatoriamente em seu ambiente eletromagnético, sem introduzir quaisquer distúrbios eletromagnéticos intoleráveis em dispositivos nesse ambiente.(IEC 60050-161)

11 distúrbio eletromagnético: Qualquer fenômeno eletromagnético que possa prejudicar o desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou que afete adversamente a vida ou a matéria inerte. Exemplo: Um distúrbio eletromagnético pode ser um ruído eletromagnético, um sinal ou uma mudança no meio de propagação não desejados.(IEC 60050-161)

12 interferência eletromagnética (EMI): Degradação do desempenho do equipamento, canal ou sistema de transmissão causada por distúrbio eletromagnético.

Obs.: Os termos *interferência e distúrbio* são muitas vezes utilizados da mesma maneira. (IEC 60050-161)

13 potência efetiva: Potência fornecida por um amplificador ou gerador.

14 condição funcional: Nível de desempenho acordado entre o cliente

e o fornecedor que é especificado no plano de ensaio.

15 plano terra: Superfície plana condutiva, cujo potencial é utilizado como uma referência comum. (IEC 60050-161)

16 imunidade (a um distúrbio): Capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de funcionar sem degradação na presença de um distúrbio eletromagnético. (IEC 60050-161)

17 nível de imunidade: Nível máximo de um determinado incidente de distúrbio eletromagnético sobre um dispositivo, equipamento ou sistema específicos, para que ele continue a operar a um grau requerido de desempenho. (IEC 60050-161)

18 emissão em banda estreita: Emissão que tem uma largura de banda menor que a de um receptor ou aparelho de medição específico. (IEC 60050-161)

19 polarização: Propriedade de uma onda eletromagnética senoidal ou vetor de campo definido em um ponto fixo no espaço, pela direção da força do vetor da intensidade do campo elétrico ou vetor de campo específico.

Obs.1: Quando essa direção varia com o tempo, a propriedade pode ser caracterizada pelo local exato descrito pela indicação do vetor de campo considerado.

Obs.2: Adaptada da IEC 60050-726.

20 modulação de pulso (PM): Processo pelo qual a amplitude de uma onda portadora varia segundo uma lei especificada, resultando em um sinal PM.

21 radiação eletromagnética: Fenômeno pelo qual a energia na forma de ondas eletromagnéticas é emitida por uma fonte no espaço.

Obs.: O termo *radiação eletromagnética* algumas vezes também abrange fenômenos de indução. (IEC 60050-161)

22 radiação eletromagnética: Energia que atravessa o espaço na forma de ondas eletromagnéticas. (IEC 60050-161)

23 **potência refletida**: Potência refletida pela carga devido à desigualdade de impedâncias entre a fonte de radiofrequência e a carga.

24 **compartimento blindado**: Caixa de malha ou folha metálica, especialmente projetada com a finalidade de separar eletromagneticamente os ambientes externo e interno.(IEC 60050-161)

25 **relação de onda estacionária (SWR)**, relação de onda estacionária de voltagem (VSWR): Relação, ao longo de uma linha de transmissão, de uma magnitude máxima à mínima de um componente de campo específico de uma onda estacionária.

- SWR é expressa pela equação:

$$SWR = \frac{(1 + r)}{(1 - r)}$$

- onde onde r é o valor absoluto do coeficiente de reflexão.

Obs.: Adaptada da IEC 60050-726.

26 **suscetibilidade (eletromagnética)**: Incapacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de funcionar sem degradação na presença de um distúrbio eletromagnético.

Obs.: Suscetibilidade é a perda de imunidade.(IEC 60050-161)

27 **sistema de linha de transmissão (TLS)**: Dispositivo gerador de campo que trabalha de modo similar ao gerador de ondas eletromagnéticas transversais (TEM). Exemplo: Stripline, célula TEM, placa paralela.

A.0.5 Propósito geral e uso prático

Os métodos de ensaio, procedimentos, instrumentos de ensaio e níveis especificados na NBR ISO 11451 destinam-se a facilitar a especificação do veículo quanto a distúrbios elétricos causados por energia eletromagnética emitida em banda estreita. É fornecida como base para um acordo mútuo

entre o fabricante do veículo e fornecedores de equipamentos embarcados e é destinada para auxiliar ao invés de criar restrições neste processo. Certos dispositivos são particularmente suscetíveis a algumas características dos distúrbios eletromagnéticos, tais como frequência, nível de severidade, tipo de acoplamento ou modulação. Dispositivos eletrônicos são regularmente mais suscetíveis a sinais modulados de radiofrequência, daqueles que não são modulados. A razão é que distúrbios de alta frequência, podem ser demodulados por semicondutores. No caso de sinais não modulados, isto conduz a um deslocamento contínuo de, por exemplo, uma tensão; no caso de sinais de amplitude modulada, as flutuações resultantes de baixa frequência podem ser interpretadas como sinais intencionais (por exemplo, informações sobre velocidade) e conseqüentemente provocar distúrbios na função do dispositivo sob ensaio (DUT - *device under test*) de maneira mais severa. Um único ensaio padrão pode não revelar toda a informação necessária sobre o DUT. É necessário portanto, para usuários da NBR ISO 11451, antecipar as condições apropriadas de ensaio, selecionar as partes aplicáveis da NBR ISO 11451 e definir metas de desempenho a serem alcançadas.

A.0.6 Condições gerais do ensaio

Salvo especificado em contrário, as seguintes condições de ensaio são comuns para todas as partes da NBR ISO 11451:

- temperatura de ensaio;
- tensão de alimentação;
- modulação;
- tempo de exposição;
- intervalos de frequência;
- definição do nível de severidade do ensaio;
- ensaio da qualidade do sinal.

Salvo especificado em contrário, as variáveis utilizadas devem ter as seguintes tolerâncias:

- até 10% para durações e distâncias;

- até 10% para resistências e impedâncias;
- até 1 dB para medidor de potência (wattímetro);
- até 3 dB para ponta de prova para medição do campo eletromagnético.

A.0.7 Modulação:

As características dos dispositivos sob ensaio (DUT), determinam o tipo e a frequência da modulação a ser utilizada. Se nenhum valor ou técnicas específicas de modulação forem acordadas entre os usuários da NBR ISO 11451, o seguinte critério deve ser utilizado:

- Senóide não modulada - onda contínua (CW).
- Senoidal com amplitude modulada (AM) por um sinal senoidal de 1 kHz a 80% (índice de modulação $m = 0,8$).
- Senoidal com pulso modulado (PM) com

$$t_{on} = 577\mu s \rightarrow \tau = 4600\mu s.$$

Na prática, a modulação de pulso (PM) não deve ser obtida utilizando o pulso negativo crescente do amplificador ou um tipo de modulação AM a 100% (índice de modulação $m = 1$).

As seguintes faixas de frequência devem ser utilizadas para todas as partes aplicáveis da NBR ISO 11451.

- CW: 0,01 MHz a 18 GHz;
- AM: 0,01 MHz a 800 MHz;
- PM: 800 MHz a 18 GHz.

A Fig.A.1 define os tipos de modulação ao qual o veículo deverá ser avaliado. Observar que as faixas de frequências dos tipos de modulação são definidas de acordo com a possibilidade de exposição à fontes de interferência, de acordo com os tipos de equipamentos e tecnologias disponíveis no mercado. Por exemplo, deve-se expor o veículo a uma modulação tipo AM, até a faixa de 800 MHz, uma vez que não existem equipamentos de telecomunicações que empregam a modulação AM para transmissão de sinais a partir de 800

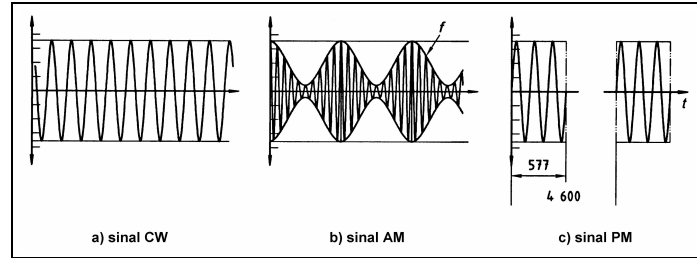


Figura A.1: Tipos de Modulações do Sinal de Prova

MHz.

Tempo de exposição: A cada frequência, deve-se expor o dispositivo (DUT) a um ensaio que exija um tempo mínimo de resposta de controle. Em todos os casos, o tempo de exposição não deve ser menor que 1 s.

Intervalos de frequência: Todos os ensaios na NBR ISO 11451 devem ser conduzidos com intervalos de frequência (logarítmicos ou lineares) não superiores àqueles especificados na tabela A.1. Os intervalos de frequência acordados pelos usuários da norma NBR-ISO11451 devem ser documentados no relatório de ensaio.

Se o limite de suscetibilidade do DUT estiver muito próximo às frequências escolhidas para o ensaio, estes intervalos de frequência devem ser reduzidos na faixa de frequência afetada com o intuito de definir os limites mínimos de suscetibilidade.

A.0.8 Definição dos níveis de severidade e elementos de funcionalidade

O usuário deve especificar o nível ou níveis de severidade do ensaio na faixa de frequência. Para ambos os métodos, substituição ou malha fechada, e para ensaios com sinais de amplitude modulada e não modulados, os níveis de severidade do ensaio da NBR ISO 11451 (campo elétrico, corrente, tensão ou voltagem) são expressos em termos de valores eficazes (RMS) equivalentes da onda não modulada.

Estes métodos utilizam níveis para ensaios com pico constante em sinais de

Tabela A.1: *ISO 11451: Varredura de Frequência*

Banda de Frequencia (MHz)	Intervalos Lineares (MHz)	Intervalos Logaritmos (%)
0,01 a 0,1	0,01	10
> 0,1 a 1	0,1	10
> 1 a 10	1	10
> 10 a 200	5	5
> 200 a 400	10	5
> 400 a 1.000	20	2
> 1,000 a 18,000	40	2

amplitude modulada e não modulada. A relação entre resultados da potência média para o sinal de amplitude modulada e a potência média para o sinal não modulado é baseada neste princípio.

Deve ser enfatizado que veículos somente devem ser ensaiados sob as condições especificadas nas partes da NBR ISO 11451, que representam a simulação dos ambientes eletromagnéticos do veículo para o qual os dispositivos sob ensaio estão sujeitos em seu uso real. Isto garante um projeto técnica e economicamente otimizado para componentes e sistemas potencialmente suscetíveis. Também, deve ser enfatizado que este anexo não objetiva servir como uma especificação de produto e não pode ser utilizado como tal. Ele deve ser utilizado em conjunto com um procedimento de ensaio especificado nas partes relevantes da NBR ISO 11451. Entretanto, nenhum valor específico para o nível de severidade do sinal de ensaio é incluído, visto que, esses devem ser determinados pelo fabricante do veículo e/ou fornecedor. Não obstante, utilizando os conceitos descritos nesse texto, e por aplicação cuidadosa e através de acordo entre o fabricante do veículo e o fornecedor do equipamento, os requisitos da condição funcional para um dispositivo específico podem ser determinados. Essa definição de níveis de severidade pode, na verdade, servir como recomendação da funcionalidade de como é esperado que um dispositivo específico funcione sob a influência dos sinais de ensaio especificados.

Elementos essenciais para classificação do desempenho de funcionalidade (FPSC)

Três elementos são necessários para determinar um FPSC. Eles podem ser

aplicados a todos os procedimentos de ensaio de imunidade a distúrbios eletromagnéticos determinados na NBR ISO 11451.

Sinal de ensaio e método

Este elemento provê a referência para os respectivos ensaios de sinal aplicados ao veículo para o método de ensaio escolhido. Este geralmente refere-se a um procedimento de ensaio específico, ou seja, às partes apropriadas da NBR ISO 11451.

Classificação da funcionalidade

Este elemento descreve a condição operacional do ensaio de um dispositivo durante e após a exposição a um ambiente eletromagnético.

- **Classe A:** todas as funções de um dispositivo ou sistema funcionam de acordo com o esperado durante e após a exposição a um distúrbio.
- **Classe B:** todas as funções de um dispositivo ou sistema funcionam durante a exposição; porém, uma ou mais funções vão além da tolerância especificada. Todas as funções retornam automaticamente aos limites normais, depois que a exposição termina. As funções de memória devem permanecer como classe A.
- **Classe C:** uma ou mais funções de um dispositivo não funcionam como esperado durante a exposição, porém retornam automaticamente à operação normal depois que a exposição é removida.
- **Classe D:** uma ou mais funções do dispositivo ou sistema não funcionam como esperado durante a exposição, e não retornam automaticamente à operação normal quando a exposição termina. O dispositivo/sistema retorna ao seu funcionamento normal após uma simples reinicialização (reset) conduzida pelo operador/usuário.
- **Classe E:** uma ou mais funções do dispositivo ou sistema não funcionam como esperado durante a exposição, e não retornam à operação normal sem reparo ou reposição do dispositivo ou sistema.

Nível de severidade do ensaio:

Este elemento contém a especificação do nível de severidade dos parâmetros essenciais de ensaio. O nível de severidade do ensaio (intensidade de campo, tensão, corrente ou potência) é aplicado no dispositivo que está sendo ensaiado por um determinado método de ensaio. O dispositivo que está sendo ensaiado deve funcionar de acordo com sua classificação de funcionalidade durante e após o ensaio.

Tabela A.2: *ISO11451-2: Nível de Severidade*

Nível de severidade do ensaio	Valor (por exemplo, V/m, mA, W)
I	25
II	50
III	75
IV	100
V	Valor específico acordado entre os usuários da NBR ISO 11451 se necessário.

Como a NBR ISO11451-1 não tem o objetivo de definir os limites de imunidade, os valores sugeridos encontram-se na norma NBR ISO11451-2 como mostrado na tabela A.2.

Podemos citar ainda valores típicos de severidades desse teste, extraído da norma FIAT 7-Z0480 como:

- Severidade I: Campo 50 V/m;
- Severidade II: Campo 100 V/m;
- Severidade III: Campo 150 V/m;

A.0.9 Métodos de ensaio

Existem duas metodologias para realização da prova:

Método da Substituição

O método da substituição é baseado na utilização da potência efetiva como parâmetro de referência para calibração e ensaio. Com este método, o nível específico para o ensaio (campo elétrico, tensão ou potência) deve ser calibrado antes do ensaio real. O ensaio é conduzido submetendo o veículo aos sinais baseados nos valores calibrados predeterminados no plano de ensaio.

Durante a calibração e ensaio, as potências efetiva e refletida devem ser registradas.

Método da Correção por malha fechada

Durante os ensaios reais com o veículo, o nível do sinal (campo elétrico, tensão, corrente ou potência) é medido utilizando um dispositivo calibrado que realimenta o sistema de geração dos sinais a fim de aumentar ou diminuir o nível dos sinais até que o nível predeterminado seja atingido.

Calibragem

A calibração deve ser realizada de acordo com os requisitos de cada método individual de ensaio. O nível dos sinais *versus* os dados de frequência deve ser estabelecido utilizando-se uma onda senoidal não modulada. O método e resultado de cada calibração devem ser documentados no relatório de ensaio.

Medição de imunidade do veículo

O sinal de distúrbio pode ser mantido no nível de ensaio requerido durante as transições de frequência (desde que o equipamento de geração de sinal esteja estável) ou o nível do sinal de distúrbio pode ser reduzido antes da frequência de transição utilizando o seguinte processo. O método escolhido e os parâmetros associados devem ser definidos no plano de ensaio.

Os usuários desta Norma precisam estar cientes dos seguintes pontos para assegurar que os ensaios sejam realizados satisfatoriamente:

- sistemas análogos podem ser susceptíveis somente a níveis de interferência intermediários;
- aplicação súbita de interferência ou transientes de comutação do gerador podem causar falhas no dispositivo sob ensaio;

As características do sinal de interferência podem ser modificadas dependendo do nível de ensaio devido às limitações no procedimento de geração do sinal (profundidade de modulação da amplitude, rejeição de harmônicos, etc.).

Instrumentação - Ensaio de qualidade do sinal

Na faixa de frequência limitada pela largura de banda do amplificador e da antena (transdutor) em uso, o conteúdo de harmônicos na saída do amplificador (até o quinto harmônico) deve ser limitado a -12 dB (-6 dB para frequências acima de 1 GHz) relativos à onda portadora, salvo especificado em contrário para um método de ensaio específico ou no planejamento do ensaio. Recomenda-se que *esta característica deva ser verificada somente durante o procedimento de calibração*.

A.1 Local de ensaio

O ensaio deve ser realizado em um compartimento blindado com absorvedores, onde o objetivo é criar uma instalação de ensaio de compatibilidade eletromagnética interna que simule o ensaio em campo aberto.

O tamanho, forma e construção do compartimento pode variar consideravelmente. Tipicamente, o piso não é coberto com material de absorção, porém tal cobertura é permitida.

O tamanho mínimo do compartimento blindado é determinado pelo tamanho da região de ensaio necessária,

o tamanho do dispositivo ou dispositivos de geração de campo eletromagnético,

os espaços livres necessários entre estes e o maior veículo a ser ensaiado, e as características do material de absorção.

Para criar a região de ensaio, o absorvedor, o sistema de geração de campo eletromagnético e a forma do compartimento são selecionados de tal forma que a quantidade de energia estranha na região de ensaio seja reduzida abaixo de um valor mínimo que fornecerá a precisão de medição desejada, conforme A.2.

O objetivo do projeto é reduzir a energia refletida na região de ensaio em - 10 dB ou menos na faixa de frequência de ensaio (não aplicável a sistemas de geração de campo eletromagnético em sistema de linha de transmissão (TLS)), como demonstrado na Fig. A.4.

Alternativamente, o ensaio pode ser realizado em um local ao ar livre.

A instalação de ensaio deve concordar com requisitos legais (nacionais) relativos à emissão de campos eletromagnéticos.

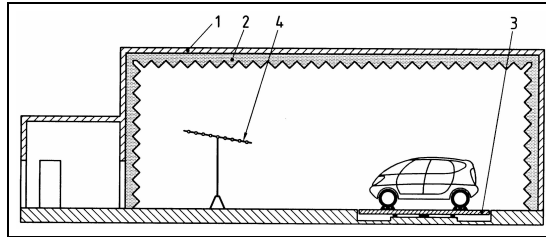


Figura A.2: *Exemplo de compartimento blindado com absorvedor: Vista Lateral*

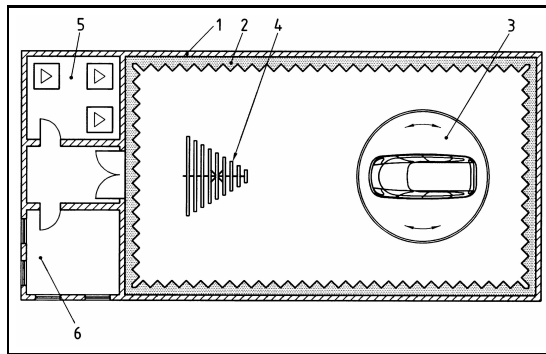


Figura A.3: *Exemplo de compartimento blindado com absorvedor: 1. Compartimento blindado com absorvedores; 2. Material absorvedor de radiofrequência (RF); 3. Dinamômetro do veículo sobre plataforma giratória; 4. Antena; 5. Sala do amplificador; 6. Sala de controle.*

A plataforma giratória mostra um giro de $\pm 180^\circ$ com dois pares de rolos entre eixos variáveis para acomodar todos os tamanhos de veículos e suas funções.

A.2 Aparelhagem de ensaio

O ensaio consiste na geração de campos eletromagnéticos irradiados utilizando conjuntos de antena com fontes de radiofrequência (RF) capazes de produzir a intensidade desejada do campo eletromagnético acima da faixa de frequências de ensaio, para as quais as seguintes aparelhagens/instrumentações devem ser utilizadas.

- Dispositivo de geração de campo eletromagnético, que pode ser uma antena ou antenas, ou um sistema de linha de transmissão (TLS), cuja construção e orientação deve ser tal que o campo eletromagnético gerado possa ser polarizado no modo especificado no plano de ensaio.
- Antenas múltiplas, amplificadores e acopladores direcionais podem ser necessários para cobrir toda a faixa de frequência.
- Ponta(s) de prova para medição do campo eletromagnético (field probe(s)), a(s) qual(ais) deve(m) ser eletricamente pequena(s) em relação ao comprimento de onda e isotrópica(s). As linhas de comunicação das pontas de prova devem ser conexões em fibra ótica.
- Gerador de sinal de radiofrequência (RF), com capacidade de modulação interna ou externa.
- Amplificador(es) de alta potência
- Medidor de potência (wattímetro) (ou instrumento de medição equivalente) para medição da potência efetiva e refletida.

A.3 Estímulo e monitoramento do veículo

- Qualquer conexão elétrica do equipamento de monitoramento ao veículo poderá causar defeitos no veículo. Extremo cuidado deve ser tomado para evitar tal efeito.
- O veículo (o dispositivo sob ensaio ou DUT) deve ser operado conforme requerido no plano de ensaio utilizando-se atuadores que tenham um efeito mínimo nas características eletromagnéticas, por exemplo, blocos de plástico nos botões de pressão, atuadores pneumáticos com tubos plásticos.

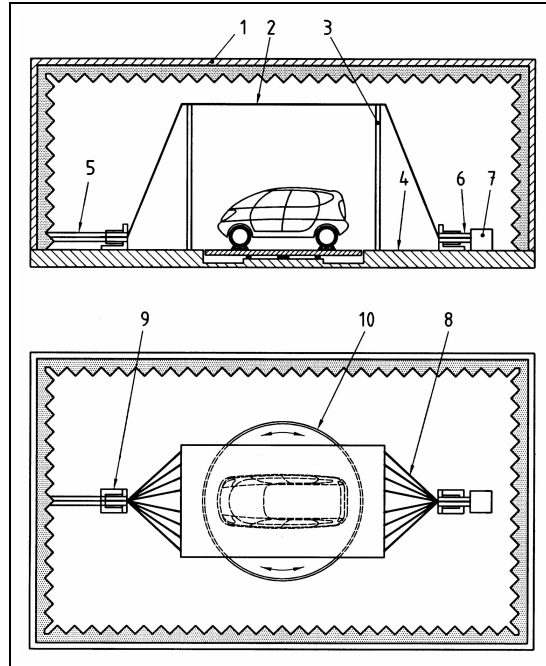


Figura A.4: Exemplo de sistema de linha de transmissão (TLS) de placas paralelas: 1.Compartimento blindado (permitido absorvedores); 2.Placa ou conjunto de fios condutivos; 3.Suportes não-metálicos; 4.Piso do compartimento blindado; 5.Linha de alimentação da fonte do sinal (cabo coaxial); 6.Cabo coaxial; 7.Carga; 8.Fios condutivos; 9.Conexão de alimentação da fonte do sinal; 10.Plataforma giratória (não requerida para este ensaio).

- As conexões a equipamentos que monitoram reações de interferência eletromagnética do veículo podem ser realizadas utilizando fibras óticas ou condutores de alta resistência.
- Outros tipos de condutores podem ser utilizados, porém requerem extremo cuidado para minimizar interações.
- A orientação, comprimento e local de tais condutores devem ser cuidadosamente documentados para assegurar a repetibilidade dos resultados do ensaio.

A.4 Configuração de ensaio: “Site”

A.4.1 Posicionamento do veículo

O veículo deve ser posicionado na região de ensaio. A região de ensaio pode conter um dinamômetro do veículo, plataforma giratória ou ambos.

Local do dispositivo de geração de campo eletromagnético (em relação ao veículo e ao compartimento blindado)

A posição ou posições do veículo em relação à antena ou ao sistema de linha de transmissão (TLS) deve(m) ser especificada(s) no plano de ensaio.

Os elementos irradiantes do dispositivo de geração de campo eletromagnético não devem estar a menos de 0,5 m de qualquer material de absorção e a menos de 1,5 m da parede do compartimento blindado.

A.4.2 Restrições da antena

Nenhuma parte da antena irradiante deve estar a menos de 0,5 m da superfície externa da carroceria do veículo.

O centro de fase da antena deve ser separado no mínimo em 2 m horizontalmente do ponto de referência.

Nenhuma parte dos elementos irradiantes da antena deve estar a menos de 0,25 m do piso.

Não deve haver material absorvedor na trajetória direta entre a antena transmissora e o DUT.

A.4.3 Restrições do sistema de linha de transmissão (TLS)

Nenhuma parte do sistema de linha de transmissão (TLS), com exceção do plano terra, deve estar a menos de 0,5 m em qualquer parte do veículo.

O elemento ou elementos irradiantes do sistema de linha de transmissão (TLS) deve ser separado no mínimo em 1 m verticalmente do ponto de referência.

O sistema de linha de transmissão (TLS) deve estender-se centralmente sobre no mínimo 75% do comprimento do veículo.

Cuidado especial deve ser tomado ao ensaiar veículos pesados como ônibus e caminhões grandes. Sob certas condições relacionadas a dimensões e frequência,

é possível que próximo de 100% da potência aplicada pode ser acoplada ao veículo por um mecanismo acoplador direcional.

Ressonâncias do ambiente também podem ter um efeito significativo na uniformidade, amplitude e direção do campo sob o sistema de linha de transmissão (TLS).

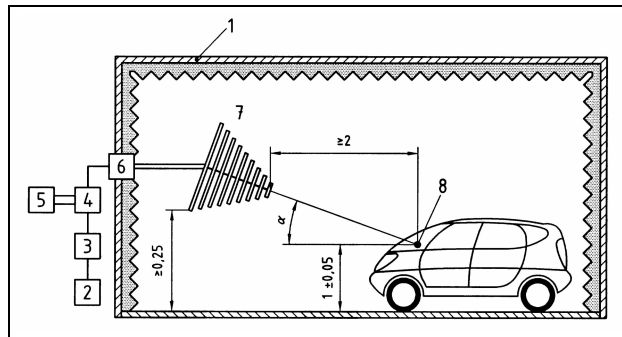


Figura A.5: Exemplo de configuração de ensaio: α Ângulo de inclinação da antena; 1. Compartimento blindado com absorvedores; 2. Gerador de sinais de radiofrequência (RF); 3. Amplificador de potência; 4. Acoplador bidirecional; 5. Potenciômetro; 6. Passagem coaxial; 7. Dispositivo de geração de campo eletromagnético; 8. Ponto de referência do veículo;

A.5 Ensaio

A.5.1 Condições do ensaio

A disposição geral da fonte de perturbação e o veículo representa uma condição de ensaio padronizado. Quaisquer divergências da configuração de ensaio padrão devem ser acordadas antes do ensaio e registradas no relatório de ensaio.

O veículo deve operar sob condições típicas de operação e carga. Estas condições operacionais devem ser claramente definidas no plano de ensaio.

A(s) orientação(es) do veículo para ensaios de imunidade irradiados também deve(m) ser definida(s) no plano de ensaio.

A.5.2 Plano de ensaio

Antes de realizar os ensaios, um plano de ensaio deve ser gerado o qual deve incluir:

- configuração de ensaio;
- faixa de frequência;
- ponto(s) de referência (ou linha se o método de quatro pontas de prova for utilizado);
- modo de operação do veículo;
- critérios de aceitação do veículo;
- definição dos níveis de severidade do ensaio;
- condições de monitoramento do veículo;
- modulação;
- polarização;
- orientação do veículo;
- localização da antena;
- conteúdo do relatório de ensaio;
- quaisquer instruções especiais e alterações do ensaio padrão.

Cada DUT deve ser verificado sob as mais significativas situações, ou seja, no mínimo no modo de reserva e em um modo onde todos os atuadores possam ser excitados.

Posições do veículo e localizações da antena adicionais ou ambos podem ser necessárias para assegurar iluminação total do veículo devido às larguras estreitas do feixe de ondas das antenas de alta frequência.

A.5.3 Método de ensaio

Tensões e campos eletromagnéticos perigosos podem existir dentro desta área. Cuidado deve ser tomado para assegurar que os requisitos para os limites de exposição aos seres humanos à energia de radiofrequência sejam atendidos.

O ensaio deve ser realizado utilizando o método de substituição, que é baseado no uso de potência efetiva como o parâmetro de referência utilizado para calibragem do campo eletromagnético e durante o ensaio.

Este método é realizado em duas fases:

- Calibragem do campo eletromagnético (se o veículo estiver presente);
- Ensaio do veículo;

A potência de radiofrequência requerida para alcançar a intensidade requerida do campo eletromagnético é determinada durante a fase de calibragem do campo eletromagnético.

A.5.4 Calibragem do campo eletromagnético

A calibragem é realizada sem o veículo no local de ensaio.

O nível (campo) de ensaio específico deve ser calibrado periodicamente, utilizando uma onda senoidal não modulada, registrando a potência efetiva requerida para produzir uma intensidade de campo eletromagnético específica (medida com uma ponta de prova para medição do campo eletromagnético).

A intensidade do campo eletromagnético deve ser calibrada para as polarizações verticais e horizontais.

Quando solicitado, os valores de potência efetiva e reversa registrados no arquivo de calibragem e uma descrição exata da posição associada da ponta de prova para medição do campo eletromagnético devem ser incluídos no relatório de ensaio.

Colocar o dispositivo gerador de campo eletromagnético no local planejado. Colocar uma ponta de prova para medição do campo eletromagnético isotrópica calibrada no ponto de referência ou, alternativamente, quatro pontas de prova para medição do campo eletromagnético isotrópicas calibradas na linha de referência vertical.

Normalmente, a linha ou ponto de referência da instalação de ensaio deve ser utilizado.

Entretanto, se não for possível estabelecer o campo requerido na região de ensaio utilizando a referência da instalação, o ponto de referência do veículo pode ser utilizado.

Acima de 200 MHz, a uniformidade do campo em dois pontos, um a 0,50 m em cada lado do ponto de referência, deve estar dentro de 6 dB em pelo menos 80% dos pontos de frequência de ensaio.

Para instalações existentes onde o requisito de uniformidade do campo não puder ser atendido, isto deve ser declarado no relatório de ensaio.

O usuário também deve assegurar boa reprodutibilidade da medição.

Podem ser utilizados métodos de interpolação entre níveis de calibração para determinar a potência efetiva específica a ser utilizada para um ensaio.

De um ponto de vista prático, o incremento entre os níveis de calibragem quando o amplificador estiver operando em uma faixa linear pode ser maior que ao operar em uma região onde a compressão ocorre (*compression point*).

Definição: Ponto de referência e linha de referência

Para as faixas de frequência de 0,01 MHz a 20 MHz ou 30 MHz e 2 GHz a 18 GHz, uma ponta de prova única para medição do campo eletromagnético deve ser utilizada para calibragem. Um ponto de referência é utilizado com a ponta de prova única que é o ponto ao qual a intensidade do campo deve ser estabelecida.

Para as faixas de frequência de 20 MHz ou 30 MHz a 2 GHz, o método de calibragem de quatro pontas de prova para medição do campo eletromagnético deve ser utilizado.

A média das leituras de quatro pontas de prova é utilizada como o valor de calibragem.

Uma linha de referência vertical é utilizada com o método de quatro pontas de prova que é uma linha vertical sobre a qual a intensidade do campo deve ser estabelecida.

O ponto de interrupção de 20 MHz ou 30 MHz é dependente do projeto da fonte de radiação na instalação do usuário; tipicamente a transformação de um sistema de linha de transmissão (TLS) para uma antena.

Posições de ponta de prova única:

- a uma altura de $1\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$ acima do piso do compartimento blindado para veículos com uma altura de teto $< 3\text{ m}$;
- a uma altura de $2\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$ para veículos com altura de teto $\geq 3\text{ m}$.

- Outras alturas podem ser especificadas e medidas.

Posições de quatro pontas de prova:

- a alturas de 0,5 m, 0,8 m, 1 m e 1,2 m, para veículos com uma altura de teto < 3 m;
- a alturas de 1,2 m, 1,5 m, 1,8 m e 2,1 m, para veículos com uma altura de teto ≥ 3 m.

Dependendo da geometria do veículo, o ponto de referência do veículo deve estar localizado a $0,2 \text{ m} \pm 0,2$ atrás do eixo dianteiro, ou $1 \text{ m} \pm 0,2$ m dentro do veículo, medido a partir do ponto de interseção do pára-brisa e o capô do veículo, o qual resulta em um ponto de referência mais próximo da antena.

Os locais alternativos no veículo poderiam necessitar do registro de uma família de dados de calibração baseados no local do ponto de referência em relação à câmara, ou seja, a posição do dinamômetro do eixo dianteiro se move com o ajuste da distância entre eixos do veículo.

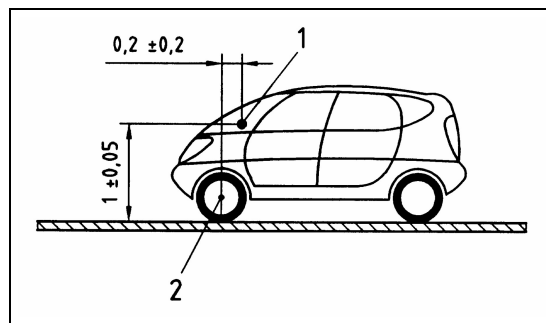


Figura A.6: *Exemplo de ponto de referência do veículo: Veículos de passeio e veículos comerciais leves: 1. Ponto de referência do veículo; 2. Eixo dianteiro.*

Ponto de referência e linha de referência da instalação:

Estes são definidos no centro da região de ensaio, conforme segue:

Posições de ponta de prova única:

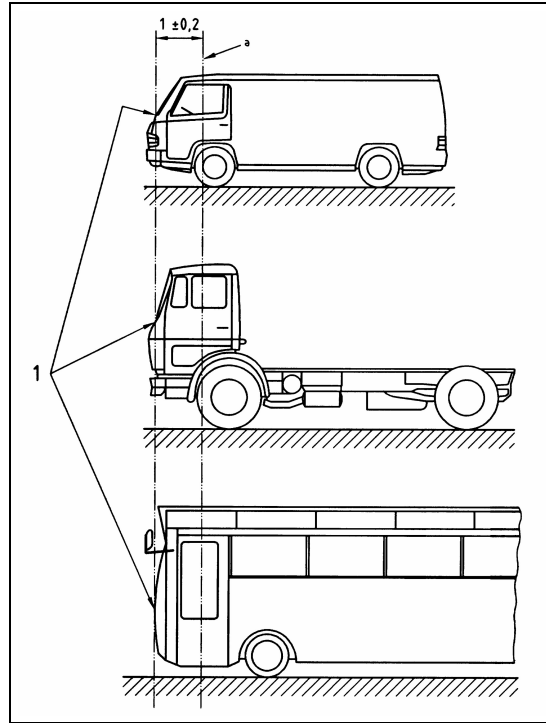


Figura A.7: Exemplo de ponto de referência do veículo em Ônibus e veículos comerciais: 1. Interseção do pára-brisa e o capô.

1. a uma altura de $1\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$ acima do piso do compartimento blindado para veículos com uma altura de teto $< 3\text{ m}$;
2. a uma altura de $2\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$ para veículos com uma altura de teto $\geq 3\text{ m}$.

obs.: Outras alturas podem ser especificadas e medidas.

Posições de quatro pontas de prova:

1. a alturas de 0,5 m, 0,8 m, 1 m e 1,2 m, para veículos com uma altura de teto $< 3\text{ m}$;
2. a alturas de 1,2 m, 1,5 m, 1,8 m e 2,1 m, para veículos com uma altura de teto $\geq 3\text{ m}$.

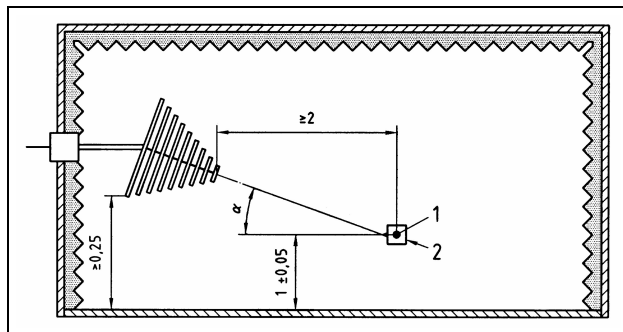


Figura A.8: *Exemplo de configuração de ensaio: Calibragem da posição de uma ponta de prova única (veículo com altura de teto ≤ 3 m): α Ângulo de inclinação da antena; 1. Ponto de referência; 2. Ponta de prova para medição do campo eletromagnético; 3. Injeção de corrente nos cabos.*

A.5.5 Procedimento de ensaio

Instalar o veículo e equipamentos associados no local de ensaio de acordo com as definições de instalação desta norma;

O veículo deve operar de acordo com o plano de ensaio.

Expor o veículo ao sinal de ensaio baseado no valor calibrado conforme predeterminado no plano de ensaio.

Uma ponta de prova para medição do campo eletromagnético pode ser colocada dentro ou fora do veículo durante o ensaio.

Conduzir o ensaio utilizando ambos os campos polarizados horizontais e verticais na faixa de frequência de ensaio.

Quaisquer exceções para esta prática devem ser especificadas no plano de ensaio.

Com o dispositivo de geração de campo eletromagnético na polarização especificada, varrer a faixa de frequência no nível de ensaio, observando quaisquer anomalias.

Continuar o ensaio até que todas as frequências, modulações, polarizações, orientações do veículo e localizações da antena especificadas no plano de ensaio sejam completadas.

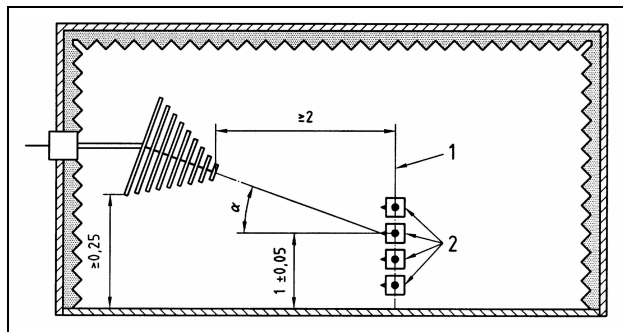


Figura A.9: *Exemplo de configuração de ensaio: Calibragem da posição de quatro pontas de prova(veículo com altura de teto ≤ 3 m): α Ângulo de inclinação da antena; 1. Linha de referência; 2. Posições das pontas de prova;*

A.5.6 Relatório de ensaio

Conforme requerido pelo plano de ensaio, um relatório de ensaio deve ser submetido detalhando as informações relativas ao equipamento de ensaio, local de ensaio, configuração de ensaio, sistemas ensaiados, frequências, níveis de potência, interações do sistema e quaisquer informações relevantes ao ensaio. As bandas de frequência sugeridas podem ser encontradas na tabela A.1, assim como os níveis severidade do ensaio, na tabela A.2.