

Roginelle Salatiel da Silva Pires

*Investigação de uma Nova Metodologia  
para Ensaaios de Suscetibilidade  
Eletromagnética em Veículos Automotivos*

Belo Horizonte – MG

Agosto de 2008

Roginelle Salatiel da Silva Pires

*Investigação de uma Nova Metodologia  
para Ensaaios de Suscetibilidade  
Eletromagnética em Veículos Automotivos*

Tese de doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito necessário à obtenção do grau de Doutora em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE POTÊNCIA  
LINHA DE PESQUISA: COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE  
ENERGIA

Belo Horizonte – MG

Agosto de 2008

Tese de Doutorado sob o título “*Investigação de uma Nova Metodologia para Ensaios de Suscetibilidade Eletromagnética em Veículos Automotivos*”, defendida por Roginelle Salatiel da Silva Pires e aprovada em 14 de agosto de 2008, em Belo Horizonte, Minas Gerais, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

---

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFMG  
Orientador

---

Prof. Dr. Renato Cardoso Mesquita  
Departamento de Engenharia Elétrica - UFMG

---

Prof. Dr. Hani Camille Yehia  
Departamento de Engenharia Eletrônica - UFMG

---

Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder  
Departamento de Engenharia Elétrica - CEFET-MG

---

Prof. PhD. Leonardo Rodrigues Araújo Xavier  
Menezes  
Departamento de Engenharia Elétrica - UnB

*Àquela que sempre sonhou os meus sonhos,  
minha mãe, Neli  
e ao meu incansável companheiro,  
Marco Aurélio.*

# *Agradecimentos*

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelas bênçãos derramadas sobre a minha vida e pela Sua alegria renovada a cada dia em mim, que é a força necessária para vencer as dificuldades cotidianas.

Expresso meu carinho e gratidão a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho e especialmente:

Ao Marco Aurélio, esposo e amigo, pelo amor e companheirismo de todos os momentos;

À minha mãe, Neli, pelo carinho, apoio e incentivo para a realização de todos os meus sonhos;

Ao meu pai, Rogério, e a todos os meus familiares, que contribuíram ao longo de toda a minha vida para a minha formação pessoal;

Aos colegas e amigos pelos momentos de alegria, de descontração e de conforto; aos amigos do CPDEE por sempre atenderem prontamente aos meus pedidos de socorro, especialmente o colega Ricardo L. da Silva Adriano;

Ao professor José Osvaldo Saldanha Paulino pela preciosa orientação, muito além da esfera acadêmica, pela atenção, amizade e encorajamento;

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, pela disponibilidade diante de alguma necessidade, especialmente ao pessoal do LEAT por me receber em suas instalações;

Aos coordenadores, professores e colegas participantes do Projeto FIAT/CNPq, pelos momentos de discussão e troca de informações e ao colega Leonardo A. L. Santos pelas medições realizadas, essenciais para a realização deste trabalho;

À equipe da Experimentação Elétrica da FIAT Automóveis pela receptividade e simpatia;

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*“A coisa mais indispensável a um homem  
é reconhecer o uso que deve fazer  
do seu próprio conhecimento.”*

**Platão**

# *Resumo*

O principal objetivo desta tese é investigar experimentalmente a viabilidade de uma nova metodologia de ensaio de suscetibilidade eletromagnética, em veículos automotores, utilizando apenas a sua parte dianteira e reduzindo a distância entre a antena e o carro. Tal proposta visa à utilização de câmaras semi-aneatóicas menores, reduzindo assim o custo de realização dos ensaios.

Inicialmente, foi realizada uma série de experimentos em câmara semi-aneatóica de porte reduzido com o intuito de caracterizar o campo eletromagnético gerado por uma antena emissora, quanto a variações de distância, da condição de reflexão da câmara e da forma de objetos bidimensionais e tridimensionais, com diferentes tipos de aberturas.

A seguir, foram realizados diversos experimentos em um ambiente de testes aberto, utilizando protótipos de veículos, em escala natural, e veículos reais inteiros e cortados, conforme a proposta. Nestes experimentos, foi realizado o mapeamento do campo elétrico no interior dos objetos sob teste observando-se a variação de distância e a comparação dos resultados obtidos para objetos inteiros e cortados. A principal ferramenta de análise utilizada para comparar os diferentes resultados foi a função coerência.

Finalmente, foram medidos os campos no interior de veículos para a condição de ensaio normalizada, em câmara semi-aneatóica de grande porte, e a condição de ensaio proposta em câmara semi-aneatóica de pequeno porte, com o intuito de se verificar a existência de correlação direta entre as grandezas observadas.

Os resultados obtidos possibilitaram uma melhor compreensão do comportamento do campo eletromagnético e dos equipamentos utilizados durante os ensaios. Os valores de coerência encontrados indicam a possibilidade de utilização da nova metodologia apresentada, pelo menos, como forma de pré-avaliação de veículos.

# *Abstract*

The main objective of this thesis is to experimentally investigate the feasibility of a new electromagnetic susceptibility test methodology, in vehicles, using only its front part and reducing the distance between the antenna and the car. Such proposal aims to using smaller semi-anechoic chambers, reducing the test's costs.

Initially, a series of experiments was held in a small semianechoic chamber in order to characterize the electromagnetic field generated by an antenna, about the changes in distance, the condition of reflection of the chamber and form of two-dimensional and three-dimensional objects, with different kinds of holes.

Next, several experiments were conducted in an open area test site, using prototypes of vehicles in natural scale, and real vehicles, whole and cut as the proposal. In these experiments, the electric field inside the object under test was measured observing the distance variation and a comparison between whole and cut objects. The main analysis tool used to compare the different results was coherence function.

Finally, the fields were measured inside vehicles for the standard test condition, in a large semianechoic chamber, and for the new proposal, in a small semianechoic chamber, in order to verifying the existence of direct correlation between the quantities observed.

The obtained results allow us to get a better understanding of the electromagnetic field behaviour and of the equipments used during the tests. The found coherence function values indicate the possibility of using the new methodology presented, at least, as a kind of vehicles pre-evaluation.

# *Lista de Figuras*

1	Montagem de testes genérica, segundo a norma militar. . . . .	p. 29
2	Posicionamento da antena, para testes de emissão, segundo a norma militar. . . . .	p. 29
3	Montagem para testes de suscetibilidade, segundo a norma militar. . . . .	p. 30
4	Evolução de equipamentos eletro-eletrônicos utilizados em veículos . . . . .	p. 31
5	Limites de referência para emissões eletromagnéticas dos veículos. . . . .	p. 38
6	Exemplo de câmara semi-aneecóica utilizada no ensaio definido pela norma ISO 11451-2. . . . .	p. 40
7	Linha de referência em veículos de passageiros e comerciais leves. . . . .	p. 41
8	Câmara semi-aneecóica da FIAT Automóveis, em Betim. . . . .	p. 45
9	Nova metodologia proposta para realização de ensaios de suscetibilidade irradiada . . . . .	p. 45
10	Alterações necessárias para implementação da nova proposta de ensaio. . . . .	p. 46
11	Estrutura absorvedora híbrida freqüentemente utilizada. . . . .	p. 50
12	Regiões de campo em torno de uma antena. . . . .	p. 52
13	Antena utilizada nos Experimentos. . . . .	p. 55
14	Vista em perspectiva de um guia de onda retangular fechado por uma placa em $x = 0$ . . . . .	p. 56
15	Disco utilizado para suporte do medidor isotrópico. . . . .	p. 58
16	Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.1. . . . .	p. 58
17	Campo elétrico medido no Experimento 1.1. . . . .	p. 59
18	Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.2. . . . .	p. 60
19	Campo elétrico medido para Experimento 1.2, sem absorvedores no solo. . . . .	p. 60



45	Campos medidos no interior do veículo a diferentes distâncias. . . . .	p. 81
46	Erros calculados para veículo inteiro em diferentes distâncias. . . . .	p. 82
47	Experimento 2.4 - Medição de campo eletromagnético no interior do veículo cortado. . . . .	p. 83
48	Campos medidos no interior do veículo cortado a diferentes distâncias.	p. 84
49	Erros calculados para veículo cortado em diferentes distâncias. . . . .	p. 85
50	Comparação entre campos medidos para carro inteiro e cortado - D = 3,0 m. . . . .	p. 86
51	Erros entre campos medidos para carro inteiro e cortado - D = 3,0 m. .	p. 87
52	“Pick-up” utilizada no experimento. . . . .	p. 88
53	Comparação entre campos medidos para carro inteiro e “pick-up- D = 3,0 m. . . . .	p. 89
54	Erros entre campos medidos para carro inteiro e “pick-up- D = 3,0 m. .	p. 90
55	Comparação entre campos medidos para carro inteiro (D=3,0 m) e carro cortado (D=1,5m). . . . .	p. 92
56	Erros entre campos medidos para carro inteiro (D=3,0 m) e carro cortado (D=1,5m). . . . .	p. 93
57	Montagens realizadas para realização de ensaios. . . . .	p. 94
58	Comparação entre ensaios realizados em ELASIS e no LACE. . . . .	p. 96
59	Erros entre ensaios realizados em ELASIS e no LACE. . . . .	p. 97
60	Fator de antena, para Modelo 3106. . . . .	p. 106
61	Ganho, para Modelo 3106. . . . .	p. 107
62	TOE (VSWR): Taxa de Onda Estacionária, para Modelo 3106 . . . . .	p. 107

# *Lista de Tabelas*

1	Limites de Emissões Irradiadas da FCC. . . . .	p. 27
2	Limites de Emissões Conduzidas da FCC. . . . .	p. 27
3	Limites de Emissões Irradiadas do CISPR22 . . . . .	p. 27
4	Limites de Emissões Conduzidas do CISPR22 . . . . .	p. 27
5	Principais fontes de campos eletromagnéticos . . . . .	p. 33
6	Passos de frequência definidos pela norma ISO11452-1:2001 . . . . .	p. 40
7	Níveis de severidade sugeridos pela norma ISO11452-2:2001 . . . . .	p. 42
8	Integrantes do Projeto de Pesquisa. . . . .	p. 47
9	Eficiência de blindagem da CSA do LACE FIAT. . . . .	p. 49
10	Máximo da função coerência para protótipo inteiro . . . . .	p. 73
11	Máximo da função coerência para protótipo cortado . . . . .	p. 75
12	Máximo da função coerência para comparação protótipo inteiro x cortado	p. 78
13	Máximo da função coerência para veículo inteiro . . . . .	p. 80
14	Máximo da função coerência para veículo cortado . . . . .	p. 83
15	Máximo da função coerência para veículo inteiro x cortado . . . . .	p. 86
16	Máximo da função coerência para veículo inteiro x “pick-up” . . . . .	p. 88
17	Máximo da função coerência para carro inteiro (D=3,0 m) e carro cortado (D=1,5m) . . . . .	p. 91
18	Máximo da função coerência para ensaios realizados em ELASIS e no LACE . . . . .	p. 95
19	Descrição dos equipamentos que constituem o conjunto de medição. . .	p. 105

# *Lista de Siglas*

<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ABS</i>	( <i>Anti-lock Brake System</i> ) Sistema de Frenagem Anti-bloqueio
<i>ANSI</i>	( <i>American National Standards Institute</i> ) Instituto Nacional Americano de Normas
<i>CENELEC</i>	( <i>Comité Européen de Normalisation Electrotechnique</i> ) Comitê Europeu para Normalização Eletrotécnica
<i>CISPR</i>	( <i>Comité International Spécial des Perturbationa Radioélectriques</i> ) Comitê Especial Internacional de Radio Interferência
<i>CNPq</i>	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
<i>CSA</i>	Câmara Semi-anecóica
<i>EMC</i>	Compatibilidade Eletromagnética
<i>EMI</i>	Interferência Eletromagnética
<i>ESD</i>	Descarga Eletrostática
<i>EUT</i>	Equipamento sob Teste
<i>FCC</i>	( <i>Federal Communications Commission</i> ) Comissão Federal de Comunicações
<i>IEC</i>	( <i>International Electrotechnical Commission</i> ) Comissão Internacional de Eletrotécnica
<i>ISO</i>	( <i>International Organization for Standardization</i> ) Organização Internacional de Padronização
<i>LACE</i>	Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética
<i>LEAT</i>	Laboratório de Extra Alta Tensão
<i>LISN</i>	<i>Line Impedance Stabilization Network</i>
<i>OATS</i>	( <i>Open Area Test Site</i> ) Campo de Testes Aberto
<i>RHAE</i>	Recursos Humanos para Atividades Estratégicas
<i>SAE</i>	( <i>Society of Automotive Engineers</i> ) Sociedade de Engenheiros da Mobilidade
<i>VSWR</i>	( <i>Voltage Standing Wave Ratio</i> ) Taxa de Onda Estacionária

# *Sumário*

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	p. 17
<b>2</b>	<b>Revisão da Literatura</b>	p. 22
2.1	Introdução . . . . .	p. 22
2.2	Compatibilidade Eletromagnética . . . . .	p. 22
2.2.1	Normalização . . . . .	p. 23
2.3	EMC no Setor Automotivo . . . . .	p. 30
2.3.1	Normalização do Setor . . . . .	p. 33
2.3.2	A Diretiva de EMC Automotiva 2004/104/CE . . . . .	p. 35
2.3.2.1	Especificações Relativas à Radiação Eletromagnética dos Veículos . . . . .	p. 37
2.3.2.2	Especificações Relativas à Suscetibilidade Eletromagnética dos Veículos . . . . .	p. 39
<b>3</b>	<b>Metodologia Proposta</b>	p. 44
3.1	Introdução . . . . .	p. 44
3.2	Nova Proposta de Ensaio de Suscetibilidade Eletromagnética . . . . .	p. 44
3.3	Metodologia de Trabalho . . . . .	p. 47
3.4	Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética - LACE . . . . .	p. 48
3.4.1	Câmara Semi-Anecóica . . . . .	p. 50
3.4.2	Antenas . . . . .	p. 52
3.5	Cavidades Ressonantes . . . . .	p. 56

<b>4 Resultados</b>	p. 57
4.1 Introdução . . . . .	p. 57
4.2 Caracterização da antena corneta <i>Model 3106</i> . . . . .	p. 57
4.2.1 Experimento 1.1 - Ambiente anecóico . . . . .	p. 58
4.2.2 Experimento 1.2 - Ambiente semi-anecóico . . . . .	p. 59
4.2.3 Experimento 1.3 - Propagação diante de um anteparo metálico bidimensional, em ambiente semi-anecóico . . . . .	p. 62
4.2.4 Experimento 1.4 - Propagação diante de um anteparo metálico bidimensional perfurado, em ambiente semi-anecóico . . . . .	p. 65
4.2.5 Experimento 1.5 - Propagação diante de um anteparo metálico tridimensional, em ambiente semi-anecóico . . . . .	p. 67
4.3 Medição de campo eletromagnético em campo aberto . . . . .	p. 71
4.3.1 Experimento 2.1 - Protótipo de carro inteiro . . . . .	p. 72
4.3.2 Experimento 2.2 - Protótipo de carro cortado . . . . .	p. 75
4.3.3 Verificação da influência do corte no protótipo . . . . .	p. 78
4.3.4 Experimento 2.3 - Veículo inteiro . . . . .	p. 80
4.3.5 Experimento 2.4 - Veículo cortado . . . . .	p. 83
4.3.6 Verificação da influência do corte em veículo real . . . . .	p. 86
4.4 Realização de ensaios . . . . .	p. 91
4.4.1 Medições realizadas em OATS . . . . .	p. 91
4.4.2 Medições realizadas em CSA . . . . .	p. 94
4.5 Discussão dos Resultados . . . . .	p. 98
<b>5 Conclusão e Propostas de Continuidade</b>	p. 100
<b>Referências</b>	p. 102
<b>Apêndice A – Descrição de Equipamentos do LACE FIAT</b>	p. 105



# 1 *Introdução*

Entende-se por Compatibilidade Eletromagnética (EMC) a capacidade de um dispositivo eletrônico funcionar adequadamente em um ambiente sem sofrer interferência eletromagnética (EMI) do mesmo, sem causar EMI em outros dispositivos eletrônicos, em sua proximidade, ou em si mesmo (PAUL, 1992). São inúmeras as fontes de emissão de ruído eletromagnético (raios, motores elétricos de corrente contínua, relés, lâmpadas fluorescentes, linhas de transmissão de alta tensão, etc), mas uma fonte de ruído cada vez mais importante são as emissões eletromagnéticas associadas a computadores e dispositivos eletrônicos digitais em geral, visto que o conteúdo espectral gerado pelos pulsos utilizados para representar os dígitos binários ocupa uma ampla banda de frequências e pode causar interferência em diversos dispositivos elétricos e eletrônicos. Recursos como a blindagem, o reposicionamento dos componentes de um sistema e a filtragem são amplamente utilizados como ferramentas de solução de problemas de EMI, mas nem sempre tais recursos alcançam a solução desejada. Daí a importância de se utilizar diversas técnicas para controle de emissão de ruídos e de imunidade, desde as fases primordiais do projeto de sistemas eletrônicos.

Os problemas relativos à EMC praticamente surgiram com a invenção das transmissões via rádio, mas foi somente com o aumento do uso de equipamentos eletro-eletrônicos e da utilização do espectro eletromagnético, devido à evolução das telecomunicações, que aumentaram as discussões relativas a este assunto. Como fruto deste debate, surgiram ao longo dos anos diversos grupos governamentais, militares e não-governamentais, como a Organização Internacional de Padronização (ISO), o Comitê Especial Internacional de Radio Interferência (CISPR), o Comitê Europeu para Normalização Eletrotécnica (CEN-ELEC), dentre outros, preocupados com o desenvolvimento de normas específicas para a área de EMC. Inicialmente, as normas visavam, principalmente, ao problema de emissões eletromagnéticas dos equipamentos, a fim de controlar o nível de poluição eletromagnética ambiental, especificando os valores de referência das grandezas medidas e os métodos de ensaio utilizados. Nas últimas décadas começaram a ser desenvolvidas normas também

para o problema da imunidade, ou seja, verificação do grau de funcionamento de um dispositivo na presença de campos eletromagnéticos intensos. As normas possuem papel fundamental no estabelecimento das relações comerciais entre os diversos países e no grau de segurança e satisfação dos consumidores.

Ao longo dos anos, a indústria automobilística também precisou voltar sua atenção para a EMC, devido à crescente utilização de eletrônica embarcada nos veículos. Pela própria natureza móvel dos veículos, estes representam um dos ambientes mais severos e imprevisíveis no que se refere à EMC, visto que podem circular nas proximidades de transmissores fixos de ondas eletromagnéticas, além de serem um dos poucos tipos de dispositivos que permitem a instalação de transmissores e de outros equipamentos eletrônicos, em seu interior, depois de serem adquiridos pelo cliente.

Atualmente, é grande o número de sistemas eletrônicos que assumem funções de conforto, segurança e controle, como injeção eletrônica, freios ABS (*Anti-lock Breaking System*), sistemas de direção (*drive by wire*), redes de comunicação de dados, computadores de bordo, etc. Assim, o problema de EMC em automóveis deixou de ser apenas um requisito de garantia de qualidade do produto, que precisava apresentar perfeita sintonia do receptor de rádio FM, por exemplo, e tornou-se uma questão de segurança pessoal, pois cada dia mais a segurança do veículo depende do correto funcionamento de seus sistemas eletrônicos.

A prevenção de problemas de EMC é obtida pela combinação de especificações rígidas (tanto para o veículo quanto para seus sub-sistemas eletrônicos), do controle rigoroso dos fornecedores de sub-sistemas, de bons projetos e da realização de vários testes, tanto nos veículos quanto nos seus componentes.

Os carros foram os primeiros produtos para consumo submetidos a uma legislação governamental, no Reino Unido, em 1952 (IEE, 2000, accessed in 2004). O objetivo inicial era limitar as emissões do sistema de ignição, a fim de prevenir a interferência em sistemas de recepção de rádio e televisão domésticos. Com o passar dos anos, o surgimento de novas tecnologias, como a introdução da eletrônica discreta, dos circuitos integrados e dos microprocessadores, motivou a criação de normas que abrangessem outros tipos de fenômenos eletromagnéticos relacionados ao ambiente automotivo. Atualmente, há normas internacionais específicas para EMC no ambiente automotivo, desenvolvidas por órgãos como ISO, CISPR e CENELEC, que cobrem todos os fenômenos básicos de EMC, a saber: emissões irradiadas de banda larga e banda estreita, emissões e imunidade a transitórios conduzidos, imunidade irradiada e descarga eletrostática (ESD).

Os ensaios de suscetibilidade (imunidade) eletromagnética irradiada consistem, basicamente, em submeter o veículo sob teste a um campo eletromagnético conhecido, em um ambiente controlado (geralmente, câmaras semi-anecóicas) e verificar suas condições de funcionamento. Desde os anos 80, a maioria dos fabricantes testavam os veículos, no que diz respeito à suscetibilidade irradiada, tipicamente, utilizando campos de 50 V/m ou até mesmo 100 V/m, embora não houvesse uma legislação específica para o setor. O principal interesse dos fabricantes na realização dos testes era a garantia de um produto confiável e de qualidade, a fim de atender às exigências do mercado consumidor. A norma europeia regulatória para os testes de imunidade irradiada foi publicada apenas em 1995, a Diretiva de EMC Automotiva 95/54/EC, fruto do trabalho de 15 representantes das maiores indústrias fabricantes de veículos europeias. O esboço da norma proposto por esta comissão, após a aprovação dos governos nacionais, tornou-se a norma regulatória da comunidade europeia (IEE, 2000, accessed in 2004). Este documento foi recentemente atualizado pela Diretiva 2004/104/EC, que apresenta modificações ocasionadas pelo aumento da eletrônica embarcada, e indica a utilização de normas da ISO e do CENELEC no que diz respeito à descrição técnica dos ensaios a serem realizados.

O presente trabalho tem por objetivo a investigação de uma nova proposta de testes de suscetibilidade eletromagnética em veículos automotivos. A proposta apresentada conjuga três alterações a serem aplicadas nos procedimentos normalizados:

- redução da distância entre a antena e o veículo sob teste;
- utilização apenas da parte dianteira do veículo, visto que a maior parte das centrais eletrônicas do automóvel encontram-se nesta parte;
- proposição do projeto de uma antena que possua desempenho otimizado diante das novas condições de teste apresentadas.

O propósito de tais alterações é a utilização de uma câmara semi-anecóica de dimensões reduzidas, quando comparada às utilizadas atualmente para realização de ensaios conforme as normas estabelecidas, diminuindo assim os custos para a realização do ensaio.

Para tal proposta ser válida, é necessário que os componentes eletrônicos do veículo sejam submetidos às mesmas solicitações eletromagnéticas que sofreriam se estivessem sendo avaliados pelos procedimentos adotados nas normas estabelecidas. Assim é de fundamental importância a plena compreensão dos principais fenômenos eletromagnéticos que ocorrem durante os ensaios atualmente realizados, e o conhecimento das implicações que tais alterações podem gerar no ambiente eletromagnético de teste.

Esta nova proposta de ensaio foi apresentada em um projeto de pesquisa inter-institucional coordenado pela FIAT Automóveis e financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), com duração de dois anos. Participam ainda deste projeto professores e alunos de graduação, mestrado e doutorado das seguintes instituições: UFMG, CEFET-MG, PUC Minas e UnB. Tal interação entre universidades e empresa é altamente significativa, pois o intercâmbio de informações entre o meio acadêmico e o meio produtivo é um fator catalisador do desenvolvimento tecnológico.

No Brasil, a EMC começou a ser tratada como disciplina de cursos de pós-graduação na década de 80 e ainda hoje é abordada pelos grandes centros nacionais de pesquisa em engenharia elétrica de forma escassa, enquanto na Europa e nos Estados Unidos, a literatura sobre procedimentos de testes de EMC e EMI somam mais de cinco décadas. Assim este projeto representa uma oportunidade de aprofundamento no estudo destes temas, consolidando a formação de novos profissionais nesta área, além de constituir uma iniciativa inovadora, visto que a tese de realização de testes de suscetibilidade eletromagnética em uma câmara semi-anecóica de dimensões reduzidas, na indústria automotiva, é inédita. A possibilidade de redução das dimensões da CSA para realização deste tipo de ensaio, representa significativa redução no custo do mesmo.

As atividades do projeto foram divididas em dois grupos: medição e simulação computacional, estando esta tese inserida no contexto do primeiro grupo. Aspectos relativos às simulações numéricas podem ser vistos na tese de doutorado defendida pelo Eng<sup>o</sup> Ricardo Luiz da Silva Adriano (ADRIANO, 2007), ressaltando o acoplamento entre antena e objeto espalhador. Já o desenvolvimento do projeto de uma antena otimizada para utilização neste tipo de ensaio foi conduzido pela UnB e o resultado apresentado na dissertação de mestrado desenvolvida pelo Eng<sup>o</sup> Javier Andrés García Alfaro (ALFARO, 2006).

No primeiro ano do projeto, foram realizados vários experimentos na Câmara Semi-anecóica (CSA) instalada no Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética (LACE) da FIAT, em Betim, com o objetivo de caracterizar o campo eletromagnético medido. Foram feitos também experimentos com antenas dipolo, devido à simplicidade de sua forma construtiva, e algumas simulações utilizando o *software* HFSS, da Ansoft. Tais resultados obtidos, inicialmente, foram importantes para avaliar os recursos disponíveis para a pesquisa, e resultaram em um planejamento de atividades detalhado com a definição de todos os experimentos que deveriam ser realizados para conclusão do projeto, conforme apresentado em (PIRES, 2005).

Assim, no segundo ano do projeto, a equipe de medição, coordenada pelo Eng<sup>o</sup>

---

Leonardo Alvarenga Lopes Santos, realizou todas as medições propostas, conforme o planejamento apresentado. A descrição detalhada deste trabalho de medição, incluindo métodos e equipamentos utilizados, além de outras observações importantes foram apresentadas em uma dissertação de mestrado (SANTOS, 2007).

Dentre os mais de 2000 resultados de medição obtidos, neste trabalho, foram selecionados alguns, considerados mais relevantes, para análise da viabilidade da nova proposta de ensaio apresentada, considerando principalmente variações na forma do objeto sob teste e sua distância relativa à antena emissora de campo. A principal ferramenta de comparação utilizada foi a função coerência, que mede a correlação existente entre sinais no domínio da frequência, devido à sua importante utilização no campo de reconhecimento de padrões, em áreas como processamento de imagens e radares.

## ***2 Revisão da Literatura***

### **2.1 Introdução**

Neste Capítulo será feita uma breve revisão sobre compatibilidade eletromagnética, principalmente o desenvolvimento desse campo da engenharia elétrica no setor automotivo. O Capítulo se inicia com a apresentação dos principais conceitos de compatibilidade eletromagnética e dos conceitos de normalização aplicados à área. Em seguida, é discutida a evolução da importância da EMC na indústria automobilística, enfatizando as principais normas adotadas no setor e os principais ensaios realizados a fim de atestar a qualidade de veículos e componentes eletrônicos veiculares, com relação à EMC, de acordo com a legislação européia.

### **2.2 Compatibilidade Eletromagnética**

Pode-se dizer que o problema da interferência eletromagnética nasceu no fim do século XIX com os primeiros experimentos de Marconi utilizando um centelhador para enviar sinais eletromagnéticos a curtas distâncias, conseguindo, em 1901, realizar a primeira transmissão transatlântica, inicializando assim, a utilização da telegrafia sem fio. Durante a segunda guerra mundial, o uso de equipamentos eletrônicos, inicialmente rádios, equipamentos de navegação e radares, acelerou, aumentando a interferência entre rádios e dispositivos de navegação dos aviões. Esse problema era facilmente resolvido com a realocação de frequências de transmissão ou com a mudança da posição de cabos. Porém, nos anos 50, 60 e 70, houve uma série de avanços tecnológicos (invenção dos transistores bipolares, dos circuitos integrados e dos *chips* microprocessadores) que propiciaram a introdução da computação e do processamento digital de sinais, aumentando significativamente os problemas de interferência, devido ao aumento da densidade de fontes de ruído ricas em conteúdo espectral. Outro fato importante a ser considerado foi o aumento das transmissões de dados e de voz, o que tornou o espectro eletromagnético mais utilizado,

dificultando a possibilidade de realocação de determinados tipos de transmissão em faixas de frequências diferentes (PAUL, 1992). Nesse contexto, torna-se cada vez mais relevante o tema da compatibilidade eletromagnética, que consiste, basicamente, na capacidade de um dispositivo eletrônico funcionar adequadamente em um ambiente sem sofrer EMI do mesmo, sem causar EMI em outros dispositivos eletrônicos, em sua proximidade, ou em si mesmo.

### 2.2.1 Normalização

A preocupação com a EMC está além dos requisitos técnicos, já que o crescente volume das relações comerciais internacionais fez nascer a necessidade de criação de normas internacionais de EMC a fim de que produtos comercializados entre os diversos países apresentem funcionamento adequado. Assim, um produto deve estar em conformidade com as normas vigentes a fim de que possa ser aceito no mercado. Existem diferentes normas que regularizam ensaios para os cinco subproblemas básicos de EMC:

- Emissão irradiada: verificação dos níveis de campos eletromagnéticos irradiados pelo equipamento e que podem ser recebidos por outros equipamentos causando interferência; é medido apenas o campo elétrico e os limites são dados em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . A faixa de frequências é de 30 MHz a 40 GHz. A verificação é realizada medindo-se os campos elétricos irradiados em uma câmara semi-anecóica ou em um campo de testes aberto. As emissões devem ser medidas tanto para polarização vertical quanto horizontal da antena, e em ambos os casos os níveis de campo devem atender aos limites estabelecidos;
- Emissão conduzida: são correntes elétricas que circulam pelo cabo de alimentação do equipamento e chegam ao quadro de distribuição elétrica, onde podem irradiar de maneira mais eficiente e causar interferência em outros equipamentos; a verificação dos limites é realizada com a introdução de uma *Line Impedance Stabilization Network* (LISN) entre o equipamento testado e a rede elétrica. A faixa de frequências para emissões conduzidas é de 450 kHz a 30 MHz. Os limites são dados em Volts;
- Suscetibilidade irradiada: verificação da capacidade de bom funcionamento do equipamento em presença de campos eletromagnéticos externos;
- Suscetibilidade conduzida: verificação da capacidade de bom funcionamento do equipamento em presença de ruído conduzido em seus cabos;

- Imunidade a descargas eletrostáticas (ESD).

A especificação do procedimento de medição a ser realizado durante a verificação de limites de emissão de um produto é tão importante quanto a própria especificação dos próprios limites, isto porque se o procedimento não é bem especificado, pode-se obter diferentes conjuntos de dados de medição para um mesmo equipamento. A medição de emissões irradiadas e conduzidas é um assunto complexo. Cada norma que define limites de emissão conduzida e irradiada possui uma norma correspondente que define claramente como os dados precisam ser medidos. Isso inclui o procedimento de teste, equipamento de teste, faixa de passagem, antenas de teste, etc.

Há basicamente duas classes de exigências de EMC que são impostas aos sistemas eletrônicos:

- Aquelas impostas por agências governamentais;
- Aquelas impostas pelo fabricante do produto.

As exigências governamentais são impostas, principalmente, para controlar o nível de interferência produzido pelo produto a fim de controlar o grau de poluição eletromagnética no ambiente. A verificação da imunidade passou a ser relevante no setor de normalização há apenas algumas décadas, principalmente devido à necessidade de proteção da instrumentação de controle de processos industriais contra distúrbios provocados por transmissores de RF, principalmente rádios transmissores portáteis, descargas eletrostáticas e transitórios. A série de normas IEC 801.x (IEC, 1984), composta de quatro partes, publicada pelo Comissão Internacional de Eletrotécnica, *International Electrotechnical Commission* (IEC), foi durante alguns anos o documento fundamental no domínio da suscetibilidade eletromagnética. Esta série foi substituída pela série IEC 61000-4-x, composta de 12 partes referentes a testes de imunidade, que é atualmente referenciada em famílias mais recentes de produtos e normas de EMC, em geral. Embora as normas governamentais também regulem requisitos de imunidade, tal preocupação é muito mais evidenciada nas exigências impostas pelos fabricantes, que têm como principal objetivo a satisfação do cliente, visando à garantia de um produto confiável e de qualidade.

Em 1933, um encontro da IEC, um órgão internacional que promulga padrões a fim de facilitar o comércio entre os países, em Paris, recomendou a formação do CISPR, para tratar do emergente problema de EMI. O comitê produziu um documento detalhando o equipamento de medição para determinar potenciais emissões de EMI. Encontros subsequentes do comitê resultaram em várias publicações técnicas que tratam de métodos de

medição e dos limites de emissão recomendados. O CISPR não é um órgão regulatório, mas simplesmente desenvolve padrões que quando adotados por um governo tornam-se o padrão para aquele governo. O CISPR publicou um conjunto de padrões de emissão em 1985, referenciados como Publicação 22, tratando de equipamentos de tecnologia e informação, incluindo-se aí os equipamentos digitais. Muitos países na Europa e em outros continentes do mundo têm adotado os padrões CISPR 22 ou alguma variante deles como seu padrão nacional, o que torna possível tratar esta norma como um padrão internacional.

Em 1979, a Comissão Federal de Comunicações dos EUA, *Federal Communications Commission* (FCC) publicou uma regulamentação que requer que as emissões eletromagnéticas (conduzidas ou irradiadas) de todos os equipamentos digitais estejam abaixo de certos limites. A faixa de frequências definida pela FCC como rádio-frequências vai de 9 kHz a 3000 GHz. Um dispositivo de rádio-frequência é qualquer um capaz de emitir energia de rádio-frequência por radiação, condução ou outros meios, seja intencionalmente ou não. A FCC define equipamento digital como *qualquer radiador não intencional (dispositivo ou sistema) que gera e utiliza pulsos temporais a uma taxa que exceda 9000 pulsos por segundo e usa técnicas digitais....* Assim, qualquer equipamento que tenha circuitos digitais e usa um sinal de *clock* com mais de 9 kHz deve obedecer a essa norma. O objetivo desta regulamentação é tentar limitar a “poluição eletromagnética” do meio ambiente a fim de evitar, ou pelo menos diminuir, o número de casos de EMI. Como nenhum equipamento digital pode ser vendido nos EUA se os seus níveis de emissões eletromagnéticas alcançarem os limites impostos pela FCC, o assunto “compatibilidade eletromagnética” gerou grande interesse entre os fabricantes de equipamentos eletrônicos comerciais, desde computadores digitais até máquinas de escrever eletrônicas.

Como parte do processo de remoção das barreiras técnicas para viabilizar o comércio entre os países membros da Comunidade Européia, a legislação da comunidade define normas diretivas, que podem abranger vários assuntos e devem ser incorporadas à legislação nacional dos países membros da comunidade. As diretivas são escritas e propostas pela comissão européia, debatidas no parlamento europeu, alteradas, se necessário e finalmente aprovadas pelo Conselho de Ministros. Inicialmente, as diretivas da área de eletrotecnologia continham todos os aspectos técnicos detalhados, como métodos de medição, limites impostos etc. Embora tais aspectos fossem baseados em normas internacionais, cada detalhe especificado na diretiva deveria ser discutido e aprovado em todos os estágios anteriormente mencionados para serem oficialmente publicadas, tornando o processo lento. Para simplificar este processo, em 1985, foi proposta uma nova abordagem para as diretivas, que passam a especificar os requisitos de proteção em termos gerais ao invés de

especificar detalhadamente cada assunto, podendo ser aplicadas a qualquer produto. A responsabilidade de elaborar o conteúdo técnico foi então atribuída ao CENELEC, que publica as normas européias (EN) para todos os assuntos relevantes da área, baseando-as tanto quanto possível em publicações já existentes de organizações internacionais de padronização como o IEC, o CISPR e a ISO (G.A.JACKSON, 1993).

Em 1989, foi publicada a Diretiva 89/336/EEC para EMC, cujos requisitos essenciais de proteção são a limitação das emissões para evitar rádio interferência e a provisão de imunidade adequada a distúrbios eletromagnéticos para assegurar a operação correta de todos os equipamentos em qualquer lugar. O escopo desta diretiva se aplica a todos os equipamentos elétricos, de pequenos componentes a sistemas de geração de potência e de tração. Inicialmente, as únicas exceções são rádio transmissores, que exigem licença e equipamento de rádio amador. Outras exceções existentes atualmente, são os equipamentos, ou grupos de equipamentos que possuem sua própria diretiva, como equipamentos médicos e veículos automotores (G.A.JACKSON, 1990).

A FCC divide os equipamentos digitais em duas classes:

- Classe A: equipamentos para uso em ambiente comercial e industrial;
- Classe B: equipamentos para uso em ambiente residencial.

Os limites impostos para equipamentos da Classe B são mais rigorosos que os da Classe A porque assume-se que o problema de interferência de um equipamento em um ambiente industrial pode ser mais facilmente corrigido que em um ambiente residencial, onde a fonte de interferência e o dispositivo suscetível provavelmente estão em maior proximidade. Além disso, o proprietário de um equipamento em um ambiente residencial provavelmente não possui conhecimentos técnicos nem os recursos financeiros para corrigir o problema, diferentemente do proprietário de ambiente industrial. Tais limites podem ser vistos na Tabela (1) e na Tabela (2). É importante salientar que as medições para os equipamentos da Classe A são realizadas com uma distância de 10 m entre antena e equipamento enquanto para a Classe B esta distância é de 3 m.

Já os limites impostos pelo CISPR para emissões irradiadas e conduzidas podem ser vistos nas Tabelas (3) e (4), respectivamente. A distância de medição entre equipamento e antena é de 10 m para a Classe B e de 30 m para a Classe A. Em geral, os limites impostos pelo CISPR são mais restritivos que os limites impostos pelo FCC.

A norma da FCC foi a primeira regulamentação para sistemas digitais nos EUA, e os limites seguem as recomendações do CISPR com variações peculiares ao ambiente

Tabela 1: Limites de Emissões Irradiadas da FCC.

<b>Frequências (MHz)</b>	<b>Classe A (dB<math>\mu</math>V/m)*</b>	<b>Classe B (dB<math>\mu</math>V/m)**</b>
30-88	39	40
88-216	43,5	43,5
216-960	46	46
>960	49,5	54

\*A distância de medição é de 10 m.

\*\*A distância de medição é de 3 m.

FONTE: (PAUL, 1992)

Tabela 2: Limites de Emissões Conduzidas da FCC.

<b>Frequências (MHz)</b>	<b>Classe A (dB<math>\mu</math>V)*</b>	<b>Classe B (dB<math>\mu</math>V)**</b>
0,45 - 1,705	60	48
1,705 - 30	69,5	48

\*A distância de medição é de 10 m.

\*\*A distância de medição é de 3 m.

FONTE: (PAUL, 1992)

Tabela 3: Limites de Emissões Irradiadas do CISPR22

<b>Frequências (MHz)</b>	<b>Classe A (dB<math>\mu</math>V/m)*</b>	<b>Classe B (dB<math>\mu</math>V/m)**</b>
30-230	30	30
230-1000	37	37

\*A distância de medição é de 30 m.

\*\*A distância de medição é de 10 m.

FONTE: (PAUL, 1992)

Tabela 4: Limites de Emissões Conduzidas do CISPR22

<b>Frequências (MHz)</b>	<b>Classe A (dB<math>\mu</math>V)*</b>	<b>Classe B (dB<math>\mu</math>V)**</b>
0,15-0,5	79	66
0,5-5	73	56
5-30	73	60

\*A distância de medição é de 30 m.

\*\*A distância de medição é de 10 m.

FONTE: (PAUL, 1992)

norte-americano. A maioria dos fabricantes de produtos eletrônicos nos EUA, já tinham limites internos e padrões impostos para seus produtos a fim de evitar problemas de campo associados com EMI. Contudo, a norma da FCC tornou o que era voluntário um problema de conformidade legal.

A comunidade militar nos EUA também impôs limites nas emissões eletromagnéticas dos sistemas eletrônicos para evitar EMI através da norma MIL-STD-461, nos anos 60, antes da FCC estabelecer suas normas, com a finalidade de assegurar o sucesso das missões. Todos os equipamentos elétricos e eletrônicos precisavam alcançar os limites de emissão destas normas. Outro aspecto da regulamentação militar é a imposição de uma exigência de suscetibilidade. Sinais interferentes são propositalmente injetados no equipamento, que deve operar adequadamente em sua presença.

Até 1992, as normas do CISPR e da FCC apenas regulamentavam as emissões dos equipamentos. Mesmo que um produto eletrônico esteja em conformidade com as exigências de emissões, ele pode causar interferência, ou ser suscetível, às emissões de outro equipamento eletrônico em sua proximidade. As normas de emissões apenas tentam limitar a poluição eletromagnética do ambiente. Exigências de suscetibilidade, utilizadas pelos militares, vão um passo à frente ao tentar assegurar a operação eletromagneticamente compatível de todos os equipamentos.

Uma diferença fundamental entre as normas militares e as normas comerciais, é que estas devem ser obedecidas em qualquer circunstância, enquanto aquelas podem deixar de ser observadas se a agência militar responsável pela utilização do produto julgar que o não cumprimento da norma não compromete o sucesso da missão. Outra diferença, é que as normas militares cobrem uma classe de produtos muito maior que as normas comerciais.

Além disso, todos os padrões militares para emissões irradiadas são definidos para uma distância de medição de 1 m entre antena e a montagem de teste (a montagem inclui o equipamento sob teste (EUT), 2 m de cabos para alimentação, conectores, LISN, conforme Fig. 1) e 2). Como a antena é posicionada muito próxima do EUT, o campo irradiado não é uniforme na abertura da antena (MIL-STD-461E, 1999).

Os ensaios de suscetibilidade, segundo a norma MIL-STD-461, também são realizados com a antena a 1 m de distância da montagem de teste, como exemplificado na Fig. 3. A norma recomenda que para as frequências nas quais a condição de campo distante não é respeitada, devem ser utilizados sensores com elementos que detectam o campo elétrico, não sendo aceitos sensores que detectam o campo magnético ou a densidade de potência e a partir destas grandezas calculam o campo elétrico. Na condição de campo distante, qualquer tipo de sensor é aceitável.

As normas militares também especificam limites para emissões conduzidas e irradiadas em banda larga, enquanto as normas comerciais inicialmente, possuíam apenas limites em banda estreita. Essencialmente, uma emissão em banda larga é aquela que apresenta maior

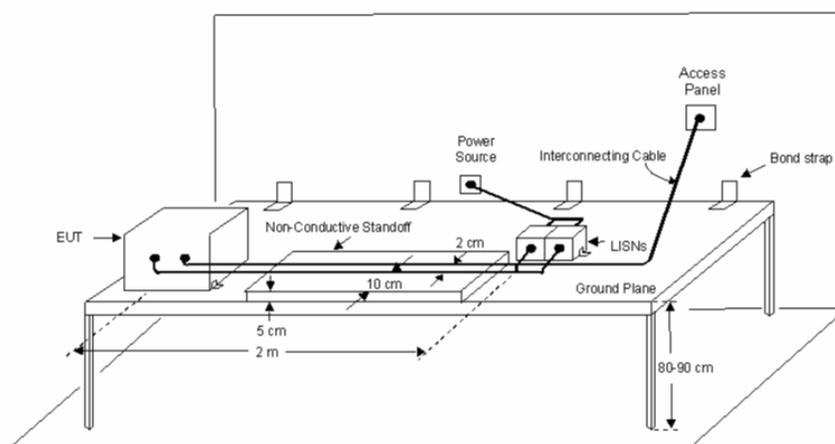


Figura 1: Montagem de testes genérica, segundo a norma militar.  
FONTE: (MIL-STD-461E, 1999)

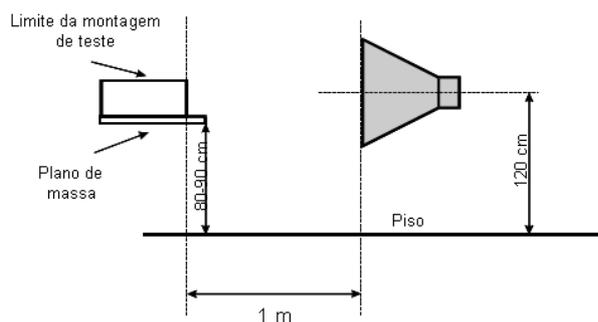


Figura 2: Posicionamento da antena, para testes de emissão, segundo a norma militar.  
FONTE: (MIL-STD-461E, 1999)

largura de banda que a faixa de passagem do equipamento de medição; essas emissões são relativamente constantes sobre uma larga faixa de frequências.

No Brasil, o órgão responsável pela normalização técnica é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A ABNT possui uma série de normas que dizem respeito a EMC, tanto para equipamentos elétricos e eletrônicos em geral, quanto para segmentos específicos como o de equipamentos eletromédicos, redes internas de telecomunicações em edificações e máquinas rodoviárias (ABNT, accessed Set.2008).

A regulamentação tornou a EMC um aspecto crítico na comercialização de produtos eletrônicos. Se o produto não obedece às normas de um país em particular, ele não pode ser vendido naquele país. O fato de que um produto realize uma tarefa bastante desejável

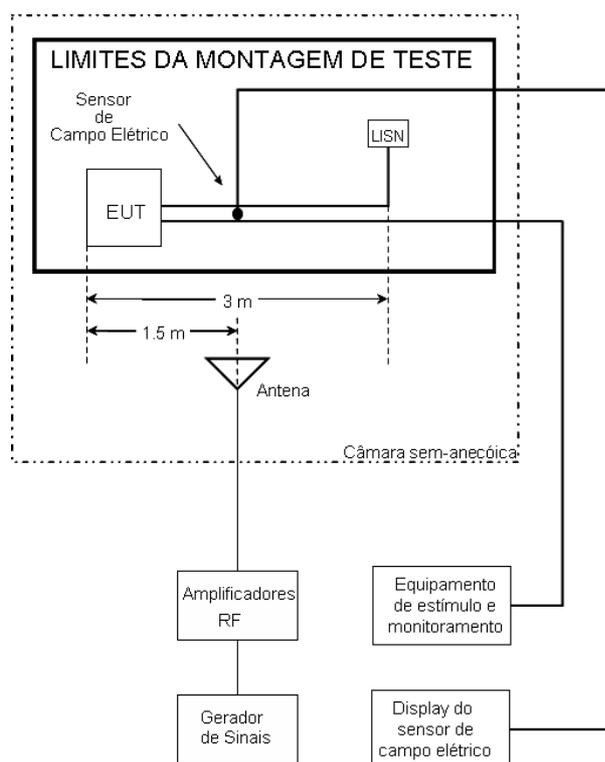


Figura 3: Montagem para testes de suscetibilidade, segundo a norma militar.  
 FONTE: (MIL-STD-461E, 1999)

e que os clientes queiram comprá-lo é irrelevante se este produto não obedece as exigências regulatórias. A evolução da tecnologia tornou o projeto de EMC uma parte tão crítica de um projeto eletrônico quanto qualquer outro aspecto tradicional.

## 2.3 EMC no Setor Automotivo

O estudo da compatibilidade eletromagnética, na indústria automobilística, tem aumentado sua relevância nas últimas décadas, visto que os veículos automotivos modernos dependem cada vez mais de sistemas de controle eletrônico sofisticados, que aumentam o conforto do motorista e a segurança do veículo. Os testes de imunidade irradiada dos automóveis constituem uma etapa importante no processo de desenvolvimento de um veículo, pois as funções dos sistemas de controle, diretamente ligadas à segurança pessoal, devem funcionar perfeitamente, mesmo em ambientes poluídos eletromagneticamente.

Os automóveis foram os primeiros produtos de mercado submetidos a uma legislação específica de EMC, no Reino Unido (I.E.NOBLE, 1994). O ruído impulsivo gerado pelo sistema de ignição possuía, originalmente, amplitude suficiente para causar interferência em aparelhos de televisão residencial. A redução do nível de emissões irradiadas para

um nível aceitável foi diretamente proposta, usando apenas alguns elementos resistivos no circuito de alta tensão dos sistemas de ignição para aumentar o tempo de subida da tensão e limitar a corrente máxima.

Cada inovação tecnológica no projeto de sistemas elétricos veiculares, tornou relevante diferentes aspectos de EMC. A introdução de rádios nas décadas de 50 e 60 exigiu um maior grau de supressão de ruídos do sistema de ignição para obter uma recepção livre de interferências, por causa da proximidade da fonte de ruído à antena de rádio do carro. A introdução de eletrônica discreta, na década de 70, trouxe a necessidade de supressão de sinais transitórios e os sistemas de controle sofisticados utilizando circuitos integrados, em larga escala, e microprocessadores, introduzidos na década de 80, exigiram um alto nível de imunidade a campos irradiados. A incorporação de equipamentos eletrônicos em veículos automotores aumentou a uma taxa considerável nas últimas décadas, como pode ser visto na Fig. 4. Tal aumento na utilização de equipamentos eletrônicos nos veículos automotivos, muitos associados a funções de segurança, torna a EMC uma das considerações mais importantes no projeto de sistemas elétricos veiculares.

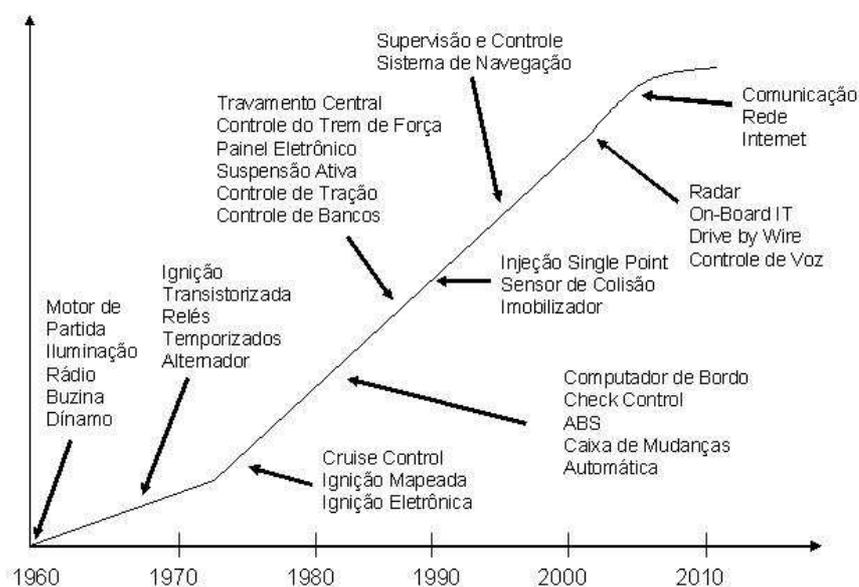


Figura 4: Evolução de equipamentos eletro-eletrônicos utilizados em veículos  
 FONTE: (SANTOS, 2002).

Os fenômenos de EMC em veículos automotivos são basicamente os mesmos observados em qualquer sistema eletro-eletrônico (emissão e suscetibilidade conduzidas e irradiadas), embora o meio eletromagnético automotivo seja bastante diferente do ambiente doméstico ou industrial. Como não há conexões externas com o veículo, as interferências conduzidas são causadas apenas pelos componentes e sistemas do mesmo, em contrapartida, tais componentes e sistemas são os únicos afetados por tais interferências. As

emissões conduzidas são geradas pela comutação de motores elétricos e chaveamento de bobinas e relés. Estas emissões são de natureza transitória e são conduzidas ao longo do cabeamento automotivo, e nos terminais das fontes de tensão dos vários sistemas eletrônicos. Os transitórios também podem ser acoplados, indutivamente ou capacitivamente, nos terminais de controle ou de sinal de vários sistemas. A solução adotada pelos fabricantes é limitar a amplitude dos transitórios gerados pelos vários componentes indutivos e assegurar que os sistemas eletrônicos tenham suficiente imunidade conduzida, mantendo-se um certo nível de sinal transitório.

As emissões irradiadas por um veículo surgem das seguintes fontes:

- o cabeamento automotivo funciona como uma antena, irradiando os transitórios conduzidos;
- sistemas eletrônicos que incorporam sinal lógico digital de alta velocidade, como microprocessadores e seus componentes associados;
- conversores CC/CC (*choppers*) eletrônicos, usados para controle de velocidade de motores ou controle de luminosidade de lâmpadas (*dimmers*).

Visto que a intensidade de campo elétrico destas emissões irradiadas é da ordem de  $\mu\text{V}/\text{m}$  ou  $\text{mV}/\text{m}$ , na maioria dos casos, o único problema provocado é interferência no rádio do veículo. Como a sensibilidade do rádio e a distância entre a antena e a fonte de interferência é praticamente fixa, a única forma de prevenir a interferência é limitar o nível das emissões irradiadas.

Os veículos automotivos estão sujeitos a um ambiente eletromagnético bastante severo criado por vários transmissores fixos ou móveis. Embora transmissores fixos geralmente irradiem com uma potência elevada (da ordem de megawatts), eles não submetem o veículo a campos eletromagnéticos muito intensos, visto que a separação entre a antena transmissora e o automóvel é relativamente grande. Por outro lado, transmissores móveis geralmente irradiam níveis relativamente baixos de potência, mas podem gerar campos localizados elevados no interior do veículo, ou mesmo em um veículo adjacente. Assim, os sistemas eletrônicos do veículo devem ter um alto nível de imunidade aos campos eletromagnéticos irradiados, visto que os consumidores esperam que seu automóvel trabalhe corretamente, mesmo em ambientes eletromagneticamente severos. As principais fontes de campo eletromagnético às quais um veículo é exposto estão na Tabela (5).

Os campos eletromagnéticos podem se acoplar aos sistemas eletrônicos do veículo di-

Tabela 5: Principais fontes de campos eletromagnéticos

Fonte	Frequência	Intensidade de Campo
Linhas de transmissão aéreas	60 Hz	10 kV/m
Transmissores de radiodifusão (LW/MW/SW)	3 kHz - 30 MHz	10 V/m
Transmissores de rádio e TV (VHF/UHF)	30 MHz - 3 GHz	1 V/m
Radares (UHF/SHF)	300 MHz - 30 GHz	1 kV/m

retamente, nas trilhas das placas de circuitos impressos ou no cabeamento interno, ou ainda através do chicote de fios na carroceria do veículo. O processo de acoplamento é altamente dependente da frequência de interesse. Abaixo de 20 MHz nem o cabeamento 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 em LW, MW, ou até mesmo na frequência de transmissão da rede elétrica, apesar dos campos irradiados intensos. Na faixa de 20 MHz a 200 MHz o cabeamento 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 cabeamento 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. Porém, como os circuitos eletrônicos, geralmente, possuem altas perdas para frequências elevadas, dificilmente ocorrem problemas na prática (I.E.NOBLE, 1994).

### 2.3.1 Normalização do Setor

A normalização possui um papel fundamental para as relações comerciais de uma economia globalizada. As normas são criadas no intuito de garantir a qualidade e confiabilidade dos produtos, melhorando o entendimento entre empresários e a satisfação do consumidor. Existem basicamente três tipos de normas: as governamentais, às quais os produtos devem obedecer a fim de que sejam comercializados; as internacionais, desenvolvidas por órgãos de normalização internacionais constituídos de membros representantes de diversos países; e as de fabricantes de produtos e equipamentos.

As normas internacionais de EMC, para o setor automotivo, são desenvolvidas por duas organizações:

1. *International Organization for Standardization (ISO)*: Organização não-governamental composta por uma rede de institutos de padronização nacionais de 151 países. O grupo de trabalho responsável pelo desenvolvimento de normas relativas à interferências em sistemas elétricos veiculares é o 3, do sub-comitê 3, do comitê técnico 22 (TC22/SC3/W3) (ISO, accessed Set.2008).
2. *Special International Committee for Radio Interference (CISPR)*: Grupo não-governamental composto de comitês nacionais integrantes da *International Electrotechnical Commission (IEC)*, responsável pela regulamentação de emissões eletromagnéticas de todo tipo de produtos. O subcomitê D é o responsável pelos equipamentos automotivos (IEC, accessed Set.2008).

As diretivas europeias são desenvolvidas pela Comissão Europeia (EC) e possuem caráter governamental para todos os países membros da Comunidade Europeia. Diferentemente do caráter generalizado preconizado para as diretivas em geral, na diretiva de EMC automotiva 95/54/EC são descritos os detalhes de requisitos técnicos, como métodos de medição e limites das grandezas medidas nos testes. Já na diretiva mais recente, a 2004/104/EC, os aspectos técnicos não são descritos detalhadamente, mas são indicadas as normas ISO e CISPR que devem ser utilizadas como referência para os procedimentos técnicos de montagem e medição.

Nos Estados Unidos, a organização responsável pela coordenação de normas, o *American National Standards Institute (ANSI)*, delegou a atividade de desenvolvimento de normas para o setor automotivo à *Society of Automotive Engineers (SAE)* (ANDERSEN; WILLIAMS, 2003, accessed in Set. 2008). As principais normas internacionais do setor são:

- *2004/104/EC - The Automotive EMC Directive*: aplicada a veículos e componentes, refere-se a emissões e imunidade irradiada;
- *CISPR-12 - Vehicles, motorboats and spark-ignited engine-driven devices - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*: aplicada a veículos, refere-se a emissões e imunidade irradiada;
- *CISPR-25 - Radio disturbance characteristics for the protection of receivers used on*

*board vehicles, boats, and on devices - Limits and methods of measurement*: aplicada a componentes, refere-se a imunidade irradiada;

- *ISO 7637 - Road vehicles - Electrical disturbances from conduction and coupling*: aplicada a componentes, refere-se a imunidade conduzida;
- *ISO 10605 - Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge*: aplicada a veículos e componentes, refere-se a descarga eletrostática;
- *ISO 11451 - Road vehicles - Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy*: aplicada a veículos, refere-se a imunidade irradiada;
- *ISO 11452 - Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy*: aplicada a componentes, refere-se a imunidade irradiada;
- *SAE J551 - Performance Levels and Methods of Measurement of Electromagnetic Radiation from Vehicles and Devices (30 to 1000 MHz)*: aplicada a veículos, refere-se a emissões e imunidade irradiada;
- *SAE J1113 - Electromagnetic Susceptibility Measurement Procedures for Vehicle Components (Except Aircraft)*: aplicada a componentes, refere-se a emissões e imunidade irradiada.

No Brasil, a Comissão de Estudo em Eletrônica, em conjunto com o Grupo de Trabalho Interferência Eletromagnética do Comitê Brasileiro de Automotivo da ABNT estão desenvolvendo uma série de normas referentes aos métodos de ensaios veiculares, tendo como referência a série de normas ISO-11451, sendo que já estão prontas as partes 1 e 2 da família NBR-ISO 11451 (ABNT, accessed Set.2008).

### 2.3.2 A Diretiva de EMC Automotiva 2004/104/CE

Essa diretiva da comunidade européia foi publicada em 14 de outubro de 2004, e se aplica tanto a veículos automotivos e seus reboques, quanto aos componentes eletroeletrônicos e unidades técnicas instalados nos mesmos. Este documento substitui a diretiva 95/54/CE, atualmente em vigor, alterando os limites de referência e a metodologia de ensaios, devido ao aumento considerável de componentes elétricos e eletrônicos instalados nos veículos automotivos, que agora controlam não apenas dispositivos com funções de

conforto, informação e entretenimento mas também funções relevantes para a segurança do indivíduo. Essa diretiva entra em vigor a partir de primeiro de janeiro de 2006 para certificação dos veículos, e a partir de primeiro de janeiro de 2009, veículos novos que não estiverem em conformidade com esta norma, não poderão ser registrados, vendidos ou circular nos países membros da comunidade européia.

A diretiva abrange:

- requisitos relacionados à imunidade a distúrbios, irradiados ou conduzidos, de funções relacionadas ao controle direto do veículo, à proteção do motorista, dos passageiros ou de outros usuários da via e de funções relacionadas a distúrbios que possam causar confusão ao motorista ou outros usuários da via;
- requisitos relacionados ao controle de emissões indesejadas, conduzidas ou irradiadas, para proteger o uso adequado dos equipamentos elétricos e eletrônicos do próprio veículo ou de outros em sua adjacência, e o controle de interferências provenientes de acessórios que possam ser adaptados aos veículos.

As funções veiculares relacionadas com a imunidade podem ser classificadas da seguinte forma:

1. Funções relacionadas ao controle direto do veículo:

- por degradação ou alteração, por exemplo, do funcionamento do motor, da marcha, do freio, das suspensões, da direção ativa, dos dispositivos de limitação de velocidade;
- por alterar a posição do motorista, por exemplo, o posicionamento do banco ou do volante;
- por alterar a visibilidade do motorista, por exemplo, os faróis e os limpadores de pára-brisas.

2. Funções relacionadas ao motorista, aos passageiros e outros usuários da via:

- por exemplo, *air bag* e sistemas de retenção de segurança.

3. Funções que, quando perturbadas, provocam confusão no motorista ou em outros usuários da via:

- perturbações ópticas: funcionamento incorreto das luzes indicadoras de mudança de direção (setas), das luzes de freio, das luzes delimitadoras do veículo,

barras de sinalização para sistemas de emergência, informação errada dos indicadores de alerta, luzes ou painéis que possam ser observados no campo de visão direta do motorista;

- perturbações acústicas: funcionamento incorreto, por exemplo, do alarme anti-roubo e das buzinas.

4. Funções relacionadas com a funcionalidade do barramento de dados do veículo:

- por bloqueio de transmissão de dados que são necessários para assegurar o correto funcionamento de outras funções relacionadas à imunidade.

5. Funções que, quando perturbadas, afetam os dados regulamentares do veículo, por exemplo, tacógrafos e hodômetros.

Constituem um modelo de veículo, no que diz respeito à EMC, os veículos que não apresentem entre si diferenças essenciais no que se refere:

- às dimensões totais e à forma do compartimento do motor;
- à disposição geral dos componentes elétricos e/ou eletrônicos e dos cabos;
- ao material principal com que é construída a carroceria do veículo (por exemplo, carroceria em aço, alumínio ou fibra de vidro). A presença de painéis de materiais diferentes não altera o modelo do veículo desde que o material principal da carroceria seja o mesmo.

Para obter a certificação de um modelo de veículo, este deve ser submetido apenas a ensaios de emissões e suscetibilidade irradiadas. Já os subconjuntos eletro-eletrônicos devem ser submetidos a ensaios de emissões e suscetibilidade conduzidas e irradiadas para serem homologados.

### 2.3.2.1 Especificações Relativas à Radiação Eletromagnética dos Veículos

A diretiva define radiação eletromagnética em banda larga como aquela cuja largura de banda é superior à de um receptor ou de um aparelho de medida específico. Já a radiação eletromagnética em banda estreita é definida como aquela cuja largura de banda é inferior à de um receptor ou de um aparelho de medida específico. Tanto os limites de referência quanto os procedimentos de ensaio são distintos para os dois tipos de emissão.

O procedimento de teste descrito a seguir, visa à medição das emissões irradiadas em banda larga, pelos sistemas elétricos e eletrônicos instalados no veículo, por exemplo, sistemas de ignição ou motores elétricos. O teste deve ser realizado de acordo com a norma CISPR 12 (5ª edição de 2001). Durante o teste o motor deve estar em funcionamento. Todos os equipamentos capazes de gerar emissões em banda larga que podem ser acionados permanentemente pelo motorista ou passageiro devem permanecer em operação com sua carga máxima, por exemplo, os motores dos limpadores de pára-brisas e ventiladores. A buzina, os motores do vidro elétrico etc. são excluídos porque não são utilizados continuamente.

Os limites de referência estabelecidos são válidos para medições realizadas em câmara semi-aneecóica ou em um campo aberto de testes, para a faixa de frequências de 30 MHz a 1 GHz, e são determinados para distâncias de 10 m e de 3 m entre carro e antena. As medidas podem ser feitas com detectores de pico ou quasi-pico. Os limites exibidos na Fig. 5(a) são para detectores quasi-pico. Se for utilizado um detector de pico, deve ser aplicado um fator de correção de 20 dB, conforme definido na CISPR 12. Devem ser realizadas medições para as polarizações vertical e horizontal da antena, e para os lados esquerdo e direito do veículo.

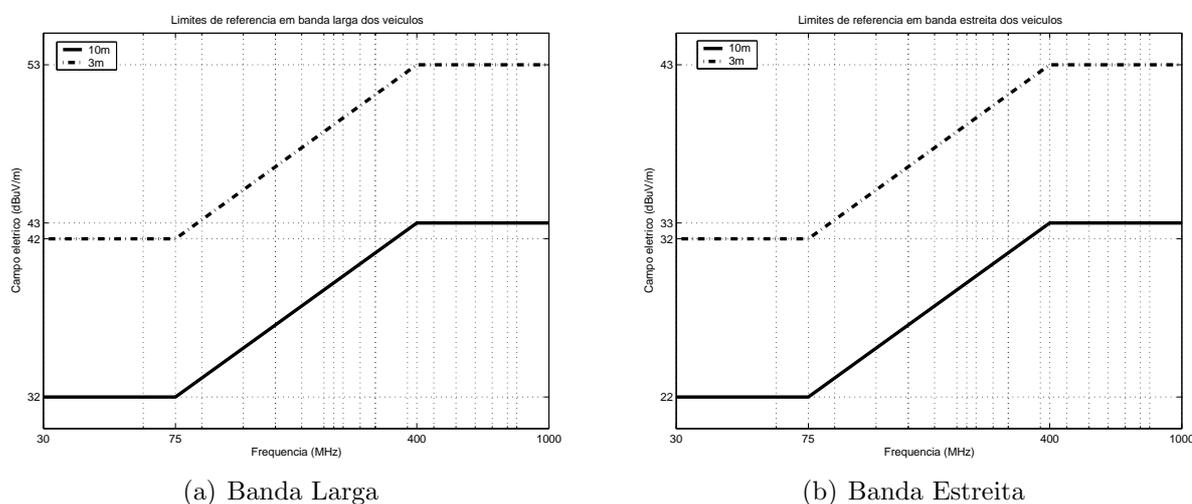


Figura 5: Limites de referência para emissões eletromagnéticas dos veículos.

O ensaio para medição da radiação eletromagnética em banda estreita é concebido para medir a radiação emitida por sistemas com microprocessadores ou por outra fonte de banda estreita. Esse teste deve ser realizado de acordo com as normas CISPR 12 (5ª edição de 2001) e CISPR 25 (2ª edição de 2002). Durante o teste, o veículo deve estar imobilizado, e seus sistemas eletrônicos devem encontrar-se no respectivo estado normal de funcionamento, a ignição deve estar ligada e o motor não deve estar em marcha. Todos os

equipamentos que possuem um oscilador interno com frequência maior que 9 kHz ou sinais repetitivos e podem ser acionados continuamente pelo motorista, ou pelos passageiros, devem permanecer em funcionamento.

Os limites de referência especificados na Fig.5(b) são definidos para medições obtidas com um detector de valor médio, realizadas em câmara semi-anecóica ou em um campo aberto de testes, para a faixa de frequências de 30 a 1000 MHz. São permitidas duas distâncias alternativas entre carro e antena: 10 m e 3 m. Devem ser realizadas medições para as polarizações vertical e horizontal da antena, e para os lados esquerdo e direito do veículo.

Como passo inicial, medem-se os níveis de emissões na faixa de frequência de 78 a 108 MHz (FM) na antena de rádio do veículo. Se o nível do valor medido, com o detector de valor médio, é menor que  $20 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  então julga-se que o veículo cumpre os limites para emissão em banda estreita e não é necessário efetuar o ensaio completo.

### 2.3.2.2 Especificações Relativas à Suscetibilidade Eletromagnética dos Veículos

De acordo com a diretiva, imunidade eletromagnética é a capacidade que tem um veículo ou um dos seus componentes ou unidades técnicas de funcionar sem perturbações em presença de interferências eletromagnéticas específicas.

O objetivo do método de teste descrito é demonstrar a imunidade dos sistemas eletrônicos do veículo, que é submetido aos campos eletromagnéticos definidos e observado durante o ensaio. O teste deve ser realizado segundo a norma ISO DIS 114521-2:2003. Na Fig. 6 observa-se um exemplo de montagem, em câmara semi-anecóica, para realização deste ensaio.

Durante o ensaio, o veículo deve estar sem cargas, exceto a aparelhagem necessária para realização do teste. O motor deve fazer girar as rodas motoras a uma velocidade constante de 50 km/h, se não houver razões técnicas para que um fabricante prefira uma velocidade diferente. O veículo é colocado sobre um banco dinamométrico com carga apropriada ou, na sua falta, colocado sobre apoios de eixo isolados, em termos eletromagnéticos, situados a uma distância mínima do solo. Todos os equipamentos que podem ser ativados, de maneira contínua pelo motorista ou passageiros, devem permanecer em condição normal de funcionamento. Todos os outros sistemas que afetam o controle do veículo pelo condutor devem estar no estado correspondente ao funcionamento normal do veículo.

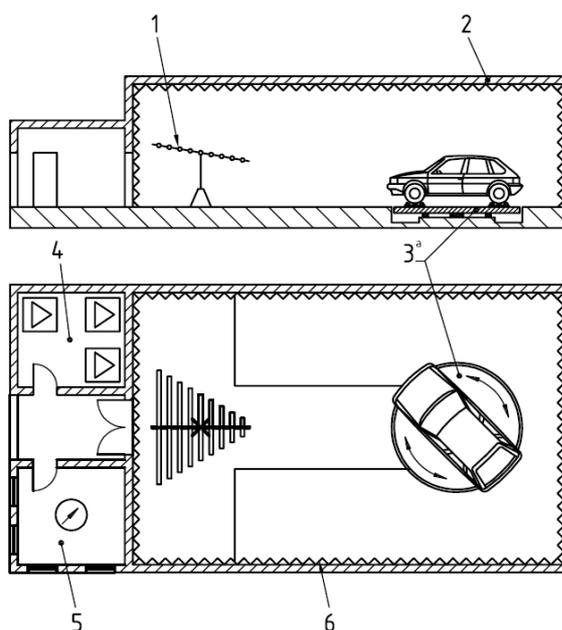


Figura 6: Exemplo de câmara semi-anecóica utilizada no ensaio definido pela norma ISO 11451-2. Legenda: 1-Antena, 2-Blindagem, 3-Banco dinâmométrico, 4-Amplificadores, 5-Sala de controle, 6-Material absorvedor.  
FONTE:(ISO, 2001b)

O veículo deve ser exposto a radiação eletromagnética na faixa de 20 a 2000 MHz (a faixa de frequência definida na diretiva 95/54/CE vai até 1000 MHz), com polarização vertical do campo. A modulação do sinal de teste deve ser:

- AM, com sinal modulante de 1 kHz e índice de modulação de 80% na faixa de 20-800 MHz;
- PM, com  $t_{on} = 577 \mu s$  e período de  $4600 \mu s$  na faixa de 800-2000 MHz.

Os passos de frequência, o tempo de exposição do veículo em cada frequência (*dwell time*) e os intervalos de teste são definidos na norma ISO DIS 11452-1:2003. Apenas a título de ilustração, na Tabela (6) são observados os passos de frequência definidos em (ISO, 2001a). Nesta mesma norma, o *dwell time* é definido como maior que 1 s.

Tabela 6: Passos de frequência definidos pela norma ISO11452-1:2001

Banda de Frequência (MHz)	Passo Máximo (MHz)
$10 < f \leq 200$	2
$200 < f \leq 1000$	20
$1000 < f \leq 18000$	200

Deve ser utilizado o método de substituição para definição das condições do campo eletromagnético irradiado durante o teste. Este método é baseado no uso da potência total como parâmetro de referência para calibração e teste. Neste método, o campo elétrico deve ser calibrado antes da realização do teste.

Para medições em câmara semi-aneecóica, a calibração deve ser realizada com quatro sensores de campo isotrópico posicionados a 0,5 m, 0,8 m, 1,0 m e 1,2 m de altura, no plano de simetria longitudinal do veículo, sobre a linha de referência, localizada  $(2 \pm 0,2)$  m atrás do eixo frontal, conforme Fig. 7, para carros de passageiros e veículos comerciais leves. Com a antena emissora posicionada na posição definida para realização do teste, mede-se o campo nos sensores, sem o veículo presente na câmara. O valor da potência total necessária para manter o nível de campo desejado, de acordo com o nível de severidade escolhido, para cada frequência, deve então ser armazenado. O nível de severidade definido em (ISO, 2001b) pode ser visto na Tabela (7).

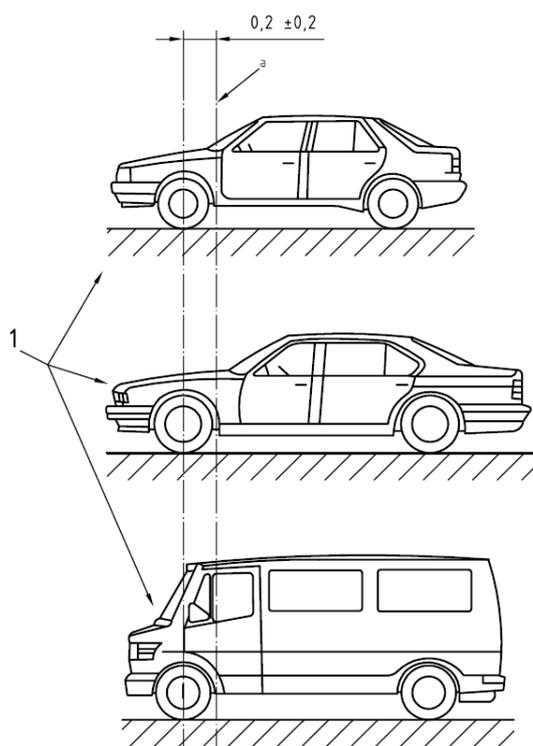


Figura 7: Linha de referência em veículos de passageiros e comerciais leves. Legenda:  
1-Eixo principal; a-A linha de referência será localizada neste plano.

FONTE:(ISO, 2001b)

A localização da antena emissora é definida da seguinte forma: qualquer parte irradiante da antena deve estar a uma distância mínima de 0,5 m da superfície externa do veículo, de 0,5 m de qualquer material absorvente, de 1,5 m da parede da câmara e a

Tabela 7: Níveis de severidade sugeridos pela norma ISO11452-2:2001

Nível de Severidade do Teste	Intensidade de Campo Elétrico (V/m)
I	25
II	50
III	75
IV	100

uma altura mínima de 0,25 m do solo. O centro de fase da antena <sup>1</sup> deve estar separado horizontalmente de, pelo menos, 2 m da linha de referência definida.

O teste é então realizado submetendo o veículo aos sinais de teste baseados nos valores calibrados, para cada frequência, notificando as anomalias observadas. As condições de teste mínimas, segundo a diretiva, e o critério de falha adotado são as seguintes:

1. Condições de teste para veículo com velocidade de 50 km/h:

- Velocidade do veículo 50 km/h  $\pm$  20%: é considerada falha se a velocidade nominal do veículo variar de  $\pm$  10%;
- Faróis ligados (manual): é considerada falha se os mesmos desligarem durante o teste;
- Limpador de pára-brisas ligado na velocidade máxima (manual): é considerada falha se o mesmo parar de funcionar completamente;
- Luz de seta do lado do motorista ligada: são consideradas falhas mudança na frequência (menor que 0,75 Hz ou maior que 2,25 Hz) e/ou mudança no ciclo de trabalho (*duty cycle*) (menor que 25% ou maior que 75%);
- Suspensão ajustável em posição normal: é considerada falha qualquer variação inesperada significativa;
- Assento do motorista e volante na posição média: é considerada falha qualquer variação maior que 10% da faixa de variação total;
- Alarme desligado: a ativação inesperada do alarme é considerada falha;
- Buzina desligada: o acionamento inesperado da buzina é considerado falha;
- *Air bag* e sistemas de retenção de segurança operacionais: qualquer ativação inesperada é considerada falha;

<sup>1</sup>Ponto de referência a partir do qual a radiação emana formando frentes de ondas esféricas. Os campos irradiados medidos na superfície de uma esfera cujo centro coincide com o centro de fase têm a mesma fase (BALANIS, 1982).

- Portas automáticas fechadas: a abertura inesperada das portas é considerada falha;
- Alavanca do freio de mão em posição normal: a ativação inesperada é considerada falha.

2. Condições de teste para o ciclo de frenagem:

- Deve incluir a operação do pedal de freio (exceto se não houver razões técnicas para realizá-la) mas não necessariamente a ação do ABS (*anti-lock brake system*): são consideradas falhas o desligamento das luzes de freio, luz de monitoramento de freio ligada com perda de função, ou qualquer outra ativação inesperada.

As medições realizadas pelo método da substituição podem ser influenciadas pelo acoplamento entre a antena e o veículo assim como pela energia refletida. Durante o teste, a potência total deve ser mantida em relação ao ponto de calibração até um limite de 2 dB de acréscimo na potência de saída. Se a taxa de onda estacionária, *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), no sistema de teste for menor que 1,2:1, a potência de saída pode ser usada como parâmetro de referência para estabelecer o nível de teste.

## ***3 Metodologia Proposta***

### **3.1 Introdução**

Neste capítulo é apresentada a nova proposta de ensaios de suscetibilidade eletromagnética assim como a metodologia de trabalho, incluindo os recursos disponíveis para realização do mesmo e os métodos aplicados na investigação do problema proposto.

### **3.2 Nova Proposta de Ensaio de Suscetibilidade Eletromagnética**

Os ensaios de suscetibilidade irradiada visam a garantir o perfeito funcionamento do automóvel quando submetido a campos eletromagnéticos intensos. As normas internacionais de EMC que definem as metodologias de testes especificam basicamente a instalação das antenas irradiantes, as posições dos veículos em relação às antenas, a faixa de frequência, a amplitude e o tipo de modulação dos campos.

Testes de suscetibilidade em veículos completos, geralmente, são realizados apenas pelos fabricantes, devido principalmente aos custos elevados de uma câmara semi-anecóica e ao caráter confidencial dos protótipos dos carros. Recentemente, a FIAT Automóveis inaugurou, em sua fábrica de Betim, o primeiro laboratório de EMC, com câmara semi-anecóica, de Minas Gerais. O laboratório foi projetado para testes e ensaios em componentes eletrônicos e veículos estáticos, possuindo 6,5 m de comprimento, 5,5 m de largura e 3,3 m de altura. Atualmente, para realização de testes em veículos completos, estes são enviados à Itália, ao instituto de pesquisa ELASIS, onde é realizado o teste em uma câmara de dimensões 20 m de comprimento, 10 m de largura e 8 m de altura (ALVARENGA, 2003), seguindo os padrões internacionais.

O objetivo da nova proposta de metodologia de testes de suscetibilidade irradiada é criar uma montagem, de dimensões reduzidas - câmara semi-anecóica de pequeno porte -

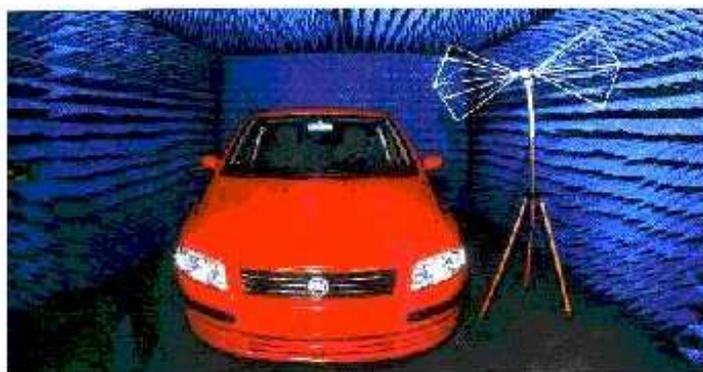


Figura 8: Câmara semi-aneecóica da FIAT Automóveis, em Betim.

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 submetidos a testes.

Propõe-se a utilização apenas da parte dianteira do automóvel (devido à concentração de centrais eletrônicas de controle nesta parte) e a aproximação entre a antena e o veículo, conforme Fig. 9, para que o ensaio possa ser realizado na câmara semi-aneecóica instalada na FIAT, em Betim.

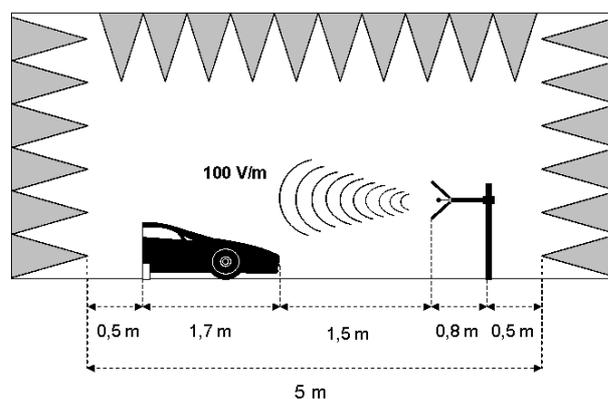


Figura 9: Nova metodologia proposta para realização de ensaios de suscetibilidade irradiada

A nova proposta além de alterar a distância entre carro e antena, modifica o modelo do veículo e provavelmente necessite de um novo projeto de antena, capaz de apresentar um comportamento adequado diante das novas condições de teste (Fig. 10).

Devido ao número e à complexidade das alterações propostas, faz-se necessário um estudo investigativo do comportamento dos campos eletromagnéticos na situação de teste

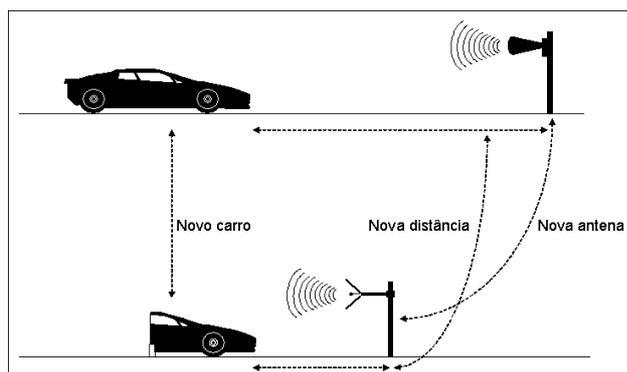


Figura 10: Alterações necessárias para implementação da nova proposta de ensaio.

descrita pela norma e na nova situação proposta, buscando-se uma correlação entre as medições realizadas nos casos distintos. Os principais desafios que surgem com a nova proposição são:

1. *Acoplamento entre carro e antena*: analisar o comportamento da antena devido a esta aproximação, verificando o comportamento de campo próximo e a variação da impedância de entrada da antena como também as características de espalhamento do carro;
2. *Terminações do modelo*: como modelar as terminações dos cabos automotivos de maneira a representar o que foi cortado e qual o impacto da alteração na geometria do modelo;
3. *Proximidade das paredes da câmara*: observar a influência das reflexões no interior da câmara, dada a proximidade do veículo sob teste e as paredes da mesma.

O estudo de viabilidade dessa nova proposta foi realizado em um projeto inter-institucional de pesquisa, financiado pelo CNPq, através do Programa de Capacitação de Recursos Humanos para Atividades Estratégicas (RHAE), proposto pela FIAT Automóveis, do qual participaram alunos e professores da UFMG, CEFET-MG, PUC-MG e UNB, distribuídos segundo a Tabela (8). As atividades se dividiram em medições e em cálculo de campo, organizadas de maneira a investigar os fenômenos eletromagnéticos presentes nos ensaios. A investigação abordada neste trabalho é sobretudo no domínio da experimentação. O projeto teve início em Março de 2005 e teve dois anos de duração.

Tabela 8: Integrantes do Projeto de Pesquisa.

<b>Instituição</b>	<b>Orientadores</b>	<b>Alunos</b>
UFMG	José Osvaldo Saldanha Paulino João Antônio Vasconcelos	2 Doutorado 1 Mestrado 1 IC*
CEFET-MG	Márcio Matias Afonso Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Tarcísio Antônio S. Oliveira	7 IC
PUC Minas	Mario Fabiano Alves Rose Mary de Souza Batalha	2 Mestrado 2 IC
UnB	Leonardo R. A. Xavier de Menezes	1 Mestrado 1 IC

\* IC: Iniciação Científica

### 3.3 Metodologia de Trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, foram desenvolvidos diversos experimentos para investigação do comportamento do campo eletromagnético em situações distintas. Os experimentos podem ser agrupados em três grupos:

1. Experimentos realizados na CSA do LACE: propostos para caracterização do campo no interior da CSA, através da medição do campo a diferentes distâncias da antena emissora, para obstáculos variados entre antena e ponto de medição. Nestes experimentos serão observados fenômenos de propagação, reflexão no solo, blindagem e ressonância;
2. Experimentos realizados em OATS: devido às limitações de dimensão da CSA do LACE, foi construído um OATS no interior do LEAT, na UFMG com o objetivo de realizar medições de campo eletromagnético no interior de protótipos e de veículos reais, inteiros e cortados, para avaliar as variações do campo no interior dos objetos em função da distância da antena e da forma do objeto sob teste;
3. Realização de ensaios em CSA: foi realizada uma montagem de acordo com os padrões definidos para realização do ensaio conforme as normas adotadas, em uma CSA de grande porte. Os campos medidos nesta montagem foram comparados aos campos medidos para a montagem proposta em CSA de pequeno porte, utilizando veículo seccionado.

Em cada grupo de experimentos foi observada a repetibilidade da configuração da montagem, a fim de que as variações observadas entre os diferentes resultados pudessem

ser atribuídas à modificação específica que se desejava avaliar.

Nas medições realizadas com veículos e protótipos foi utilizada a função de correlação cruzada como ferramenta de comparação de similaridade entre os resultados observados. Esta função é habitualmente utilizada para detecção de sinais conhecidos em meio a ruído, conforme exemplificado em (VIEIRA et al., 2001). O valor máximo é uma medida da semelhança do sinal recebido e da réplica armazenada. O valor máximo desta função é 1 e ocorre quando há uma coincidência perfeita, para  $\tau = 0$ , ou seja, quando não há deslocamento relativo entre os sinais. Matematicamente, é descrita pela Eq. (3.1), onde o índice  $r$  se refere ao sinal recebido, o índice  $a$  refere-se à réplica armazenada,  $\tau$  representa o deslocamento entre os sinais,  $n$  é um valor inteiro e  $K$  é um fator de normalização.

$$R_{r,a}(\tau) = \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{N-1} f_r(n) f_a(\tau + n) \quad (3.1)$$

A função de coerência é uma função real, cujo resultado varia entre 0 e 1 e que avalia a medida de correlação entre dois sinais  $x$  e  $y$  para cada frequência  $\omega$ , conforme a Eq. (3.2), onde  $R_{xy}(\omega)$  é a densidade espectral cruzada e  $R_x(\omega)$  e  $R_y(\omega)$  são as densidades espectrais de potência dos sinais comparados (SMITH, accessed Set.2008).

$$C_{xy}(\omega) = \frac{|R_{xy}(\omega)|^2}{R_x(\omega)R_y(\omega)} \quad (3.2)$$

Como os sinais de campo elétrico apresentados neste trabalho são analisados no domínio da frequência, ao longo do texto será utilizado o termo função coerência para avaliar a correlação existente entre os sinais comparados.

Nas seções seguintes, serão descritos equipamentos utilizados nas montagens e revistos alguns conceitos importantes para avaliação dos resultados obtidos.

### 3.4 Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética - LACE

As medições do projeto foram, em sua grande maioria, realizadas no Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética da FIAT Automóveis. Os principais equipamentos utilizados para a realização dos testes propostos são:

- Câmara semi-anecóica (CSA):

Dimensões externas: 6,5 m × 5,5 m × 3,3 m;

Espaço útil com absorvedores: 5 m × 3,8 m × 2,4 m;

1 porta blindada de 0,9 m × 2,1 m operada manualmente;

1 porta blindada de 3 m × 2,5 m operada pneumaticamente;

2 filtros de 32 A e 60 Hz para alimentação dos equipamentos;

Eficiência de blindagem descrita na Tabela (9).

- Conjunto para medição de suscetibilidade irradiada composto por antenas e amplificadores com capacidade de irradiar campos eletromagnéticos de até 200 V/m à distância de 1 m do ponto de medição na faixa de frequência de 200 MHz a 1 GHz. A descrição completa dos equipamentos pode ser vista no Apêndice A;
- Instrumentação de controle auto-recursiva que controla o ganho dos amplificadores em tempo real proporcionando a estabilidade do campo a ser irradiado durante a excursão de todo o espectro de frequência;
- Sistema de monitoramento em tempo real que realiza a conversão de sinal óptico em elétrico, capaz de registrar imagens durante a execução do teste e convertê-las em sinal óptico capaz de ser reproduzido fora da CSA;
- Conjunto de medição composto por antenas e medidor isotrópico de campo elétrico capaz de identificar qualitativamente e quantitativamente o campo eletromagnético no espaço;
- Outros equipamentos que poderão ser utilizados nas atividades desenvolvidas durante o projeto como osciloscópio, geradores de sinal, analisador de espectro e analisador de rede.

Tabela 9: Eficiência de blindagem da CSA do LACE FIAT.

Frequência	Atenuação (dB)
<b>Campo Magnético</b>	
1kHz	20
10kHz	56
200kHz	100
<b>Campo Elétrico</b>	
200kHz-50MHz	100
50MHz-10GHz	100

### 3.4.1 Câmara Semi-Anecóica

Inicialmente, as normas de EMC recomendavam que os ensaios fossem realizados em campos abertos de teste (OATS - *Open Area Test Site*), com baixos níveis de campo eletromagnético ambiente. Porém, com o passar dos anos, o crescente uso da energia elétrica e de equipamentos eletro-eletrônicos aumentou consideravelmente o ruído eletromagnético. Nesse contexto, as câmaras anecóicas e semi-anecóicas surgem como ferramentas importantes para a realização de ensaios de EMC.

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. Uma câmara é considerada anecóica se há absorvedores no piso, e semi-anecóica se o piso é um plano de terra.

O tipo de absorvedor utilizado nas câmaras varia de acordo com o tipo de teste a ser realizado e com os fabricantes de absorvedores e de câmaras (HOLLOWAY et al., 2002). Na Fig. 11 observa-se uma estrutura absorvedora híbrida muito utilizada, que consiste em um tipo de estrutura afilada de uretano dopada com carbono, superposta a uma série de camadas dielétricas, uma camada de ar, uma fina camada de ferrite e outra camada de dielétrico. Uma escolha criteriosa das propriedades dos materiais utilizados, das dimensões e do tipo de forma afilada a ser utilizada (pirâmides, cones, cunhas), pode formar uma estrutura absorvedora de banda larga ótima. Um estudo sobre diferentes tipos de estruturas absorvedoras e suas principais características é realizado em (HOLLOWAY et al., 1997). Tipicamente, este tipo de absorvedor híbrido é utilizado para uma faixa de frequência de 30 MHz a 3 GHz, ou maior.

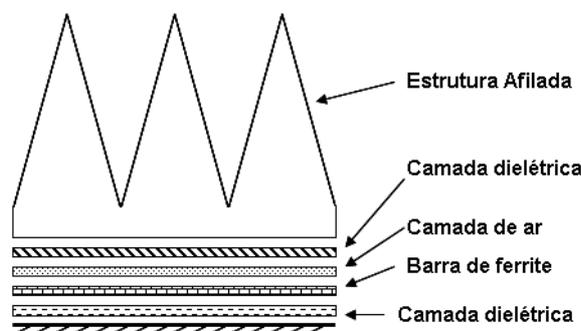


Figura 11: Estrutura absorvedora híbrida frequentemente utilizada.

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 al-

cançados antes que possam ser utilizadas como um instrumento de ensaio.

Os produtos são testados quanto à imunidade para assegurar seu perfeito funcionamento na presença de campos eletromagnéticos presentes no meio ambiente, como especificado na norma IEC-61000-4-3 (*Electromagnetic Compatibility (EMC)- Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*). Como as medidas são referenciadas ao espaço livre, elas são realizadas em câmaras anecóicas ou câmaras semi-anecóicas com absorvedores posicionados, pelo menos, em algumas partes do solo condutor. Assim, a fim de que uma câmara seja certificada para testes de imunidade, alguns critérios de qualidade precisam ser observados. O desempenho de uma câmara é determinada pela medição da uniformidade do campo em 16 pontos, sobre uma superfície de teste de  $1,5 \times 1,5$  m, na faixa de frequência de 80-1000 MHz. Se os campos variam menos de 6 dB em 12 dos 16 pontos, a câmara é considerada equivalente ao espaço livre e aceita para o teste de imunidade.

A referência para testes de emissão é uma OATS ideal, uma área aberta, plana equipada com um grande plano de terra perfeitamente condutor (em princípio, uma OATS ideal deveria ser infinita). Como uma OATS, com um plano de terra perfeitamente condutor, não tem reflexões, exceto aquelas provenientes do plano de terra, ela pode ser bem representada por uma câmara semi-anecóica, que também possui apenas as reflexões provenientes do plano de terra. A capacidade de uma câmara semi-anecóica simular uma OATS é determinada pela comparação da sua atenuação medida com a atenuação calculada para uma OATS ideal, conforme (ANSI, 1992).

A atenuação, para qualquer ambiente de medição, é definida em termos dos circuitos equivalentes das antenas transmissora e receptora (HOLLOWAY; KUESTER, 1996), conforme a Eq. (3.3), onde  $V_t$  é a tensão no terminal da antena emissora e  $V_R$  é a tensão nos terminais da carga conectada na antena receptora. A atenuação pode ser calculada diretamente a partir das propriedades da antena e do ambiente de forma mais direta utilizando o fator de antena ( $a_F$ ) das antenas utilizadas durante a medição. Se o fator de antena das antenas transmissora e receptora é o mesmo, então a atenuação é dada pela Eq. (3.4), onde  $f_m$  é a frequência, em MHz e  $E_{H,V}$  é o campo elétrico normalizado na antena receptora. Os índices H e V correspondem à polarização horizontal e vertical das duas antenas na câmara, respectivamente.

$$A = \frac{V_t}{V_R} \quad (3.3)$$

$$A(\text{dB}) = -20 \log(f_m) + 48,92 + 2a_F(\text{dB}/m) - E_{H,V}(\text{dB}\mu\text{V}/m) \quad (3.4)$$

Se a atenuação volumétrica medida varia de  $\pm 4\text{dB}$  da atenuação teórica calculada para OATS, na faixa de 30 a 1000 MHz, então a câmara é considerada equivalente a uma OATS e válida para realização de testes de emissão conforme especificados nas normas ANSI-C63.4 e CISPR-22.

### 3.4.2 Antenas

Segundo (KRAUS, 1983) uma antena de rádio pode ser definida como uma estrutura associada com a região de transição entre uma onda guiada e uma onda no espaço livre, ou vice-versa. Nos ensaios de EMC as antenas têm um papel fundamental pois são os transdutores utilizados para emitir os sinais de teste ou captar as emissões do dispositivo testado. Daí a importância de conhecer suas principais características para melhor compreender os resultados obtidos durante os ensaios.

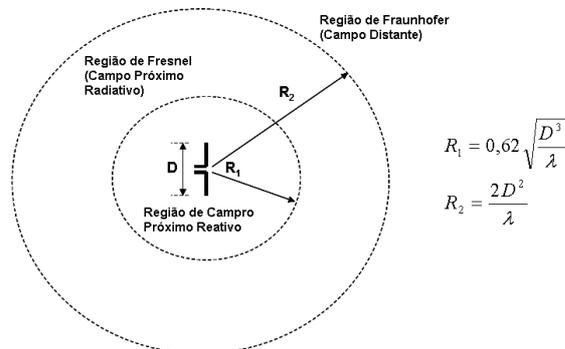


Figura 12: Regiões de campo em torno de uma antena.

O espaço em torno de uma antena geralmente é dividido em três regiões que são definidas de acordo com a estrutura do campo em cada uma delas e que podem ser visualizadas na Fig. 12. Pode-se descrever cada uma das regiões da seguinte forma <sup>1</sup>:

- Região de campo próximo reativo: é definida como a região que envolve a antena, na qual o campo é predominantemente reativo. Para a maioria das antenas o limite dessa região é definido pela Eq. (3.5), onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $D$  é a maior dimensão da antena.

$$R < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad (3.5)$$

<sup>1</sup>As equações apresentadas são válidas para antenas em espaço livre.

- Região de campo próximo radiante (Região de Fresnel): é definida como a região intermediária entre a região de campo próximo reativo e a região de campo distante, na qual o campo radiante é predominante (a densidade de potência irradiada é maior do que a densidade de potência reativa) e a distribuição angular do campo é dependente da distância da antena. Se a antena tem uma dimensão máxima pequena, comparada ao comprimento de onda, essa região pode não existir. Os limites desta região são definidos na Eq. (3.6). Nesta região, o padrão de campo é uma função da distância radial e a componente radial de campo pode ser considerável.

$$0,62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \geq R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.6)$$

- Região de campo distante (Região de Fraunhofer): é definida como a região na qual a distribuição angular de campo é praticamente independente da distância da antena. Nesta região, as componentes de campo são praticamente transversas e a distribuição angular é independente da distância radial em que as medições são realizadas. O limite desta região é dado pela Eq. (3.7).

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.7)$$

Vale ressaltar que a aplicação da Eq. (3.7) só é válida para os casos em que  $D > \lambda$ . De maneira geral, a região de campo distante pode ser definida para  $R > 10\lambda$ .

Para descrever o desempenho de uma antena, definições de vários parâmetros são necessários. As definições aqui apresentadas podem se encontradas em (BALANIS, 1982).

1. Diagrama de Radiação: é definido como uma função matemática ou uma representação gráfica das propriedades de radiação da antena como uma função do espaço de coordenadas. Na maioria dos casos, o diagrama de radiação é determinado na região de campos distantes e é representado em função das coordenadas direcionais. As propriedades de radiação incluem densidade de potência irradiada, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade ou polarização;
2. Intensidade de Radiação (U): é a potência irradiada por uma antena, por unidade de ângulo sólido. Como é um parâmetro de campo distante, é obtida pela multiplicação da densidade de potência irradiada, descrita na Eq. (3.8) como  $W_{rad}$ , pelo quadrado da distância;

$$U = r^2 W_{rad} \quad (3.8)$$

3. Diretividade (D): é a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção da antena e a intensidade de radiação média em todas as direções, que é dada pela potência total irradiada pela antena dividida por  $4\pi$ , conforme a Eq. (3.9). De forma mais simples, é a razão entre a intensidade de radiação de uma antena e a intensidade de radiação de uma fonte isotrópica. Se não é determinada uma direção, essa informação se refere à diretividade máxima;

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (3.9)$$

4. Ganho (G): é uma propriedade similar à diretividade, porém considera tanto a eficiência da antena quanto suas características direcionais. Na Eq. (3.10), observe-se a relação entre ganho e diretividade, onde  $e$  é a eficiência de radiação da antena.

$$G(\theta, \phi) = eD(\theta, \phi) \quad (3.10)$$

O ganho absoluto de uma antena é dado pela relação entre a intensidade de radiação da antena e a intensidade de radiação que seria obtida se a potência recebida pela antena fosse irradiada isotropicamente, ou matematicamente, de acordo com a Eq. (3.11).

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (3.11)$$

Na maioria das vezes, utiliza-se o ganho relativo, que é definido como a razão entre o ganho de potência, em uma dada direção, e o ganho de potência de uma antena de referência, na mesma direção. A potência de entrada deve ser a mesma para as duas antenas. A antena de referência pode ser qualquer uma cujo ganho é conhecido, porém usualmente o ganho é calculado com relação a uma fonte isotrópica, sem perdas;

5. Largura de Banda (BW): é a faixa de frequências para a qual a desempenho da antena, com relação a alguma característica, respeita algum padrão específico de comportamento;
6. Impedância de Entrada ( $Z_{in}$ ): é definida como a impedância apresentada nos terminais de uma antena, ou a relação entre a tensão e a corrente em seus terminais, ou ainda a razão entre as componentes apropriadas de campo elétrico e magnético naquele ponto. Geralmente, é função da frequência, e determina a largura de banda de uma antena. Depende ainda de muitos fatores como a geometria, o método de

excitação e a proximidade da antena a outros objetos. Na maioria dos casos, dada à complexidade da geometria das antenas, é determinada experimentalmente;

7. Fator de Antena (AF): é a razão entre o campo elétrico incidente na superfície de uma antena e a tensão lida em seus terminais dada pela Eq. (3.12). Pode também ser expressa em decibéis conforme a Eq. (3.13). É um parâmetro de caracterização das propriedades de recepção de uma antena muito utilizado na área de EMC (PAUL, 1992); geralmente é um dado fornecido pelo fabricante da antena.

$$AF = \frac{|\hat{E}_{inc}|}{|\hat{V}_{rec}|} \quad (3.12)$$

$$AF_{dB} = E_{inc}(dB\mu V/m) - V_{rec}(dB\mu V) \quad (3.13)$$

Na literatura, a maior parte dos estudos realizados na área de antenas são para suas características na região de campo distante (campos recebidos a quilômetros de distância da antena emissora), o que é perfeitamente compreensível pensando do ponto de vista de telecomunicações. A análise em campo distante é simplificada devido às condições de propagação do campo nesta região. Porém, na área de EMC é grande o interesse pelos campos medidos nas proximidades da antena emissora, exigindo em muitas situações uma análise na região de campo próximo. Nesta região, as equações de campo não podem ser simplificadas, aumentando o grau de complexidade da análise.

A antena utilizada nos experimentos é uma *Double Ridged Waveguide Horn*, modelo 3106 fabricada pela empresa ETS Lindgren, caracterizada por elevado ganho em uma ampla faixa de frequência, de 200 MHz a 1 GHz, cuja forma pode ser vista na Fig. 13. As características fornecidas pelo fabricante desta antena podem ser vistas no Apêndice B.

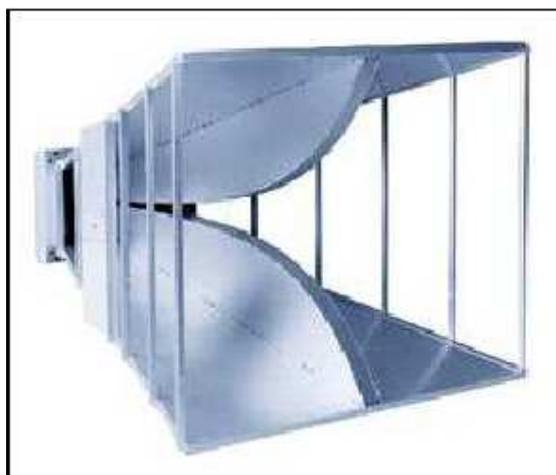


Figura 13: Antena utilizada nos Experimentos.

## 3.5 Cavidades Ressonantes

Uma cavidade ressonante é um dispositivo fechado no qual ocorre armazenamento de energia, sendo equivalente a um circuito ressonante. Em seu interior a energia oscila de um lado a outro passando de inteiramente elétrica a inteiramente magnética, em forma de onda estacionária. A energia nesta condição não é transmitida, mas circula de uma forma para a outra, podendo haver concentrações de energia em determinadas regiões do espaço. O modo de uma onda TE numa cavidade retangular, como a exibida na Fig. 14, é, em geral, designado como um modo  $TE_{lmn}$ , onde  $l$  se refere às variações dos campos na direção  $x$ ,  $m$  na direção  $z$  e  $n$  na direção  $y$ .

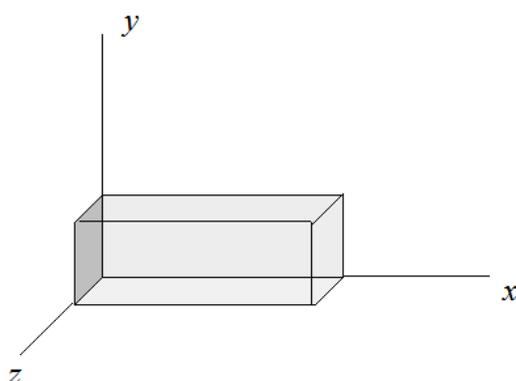


Figura 14: Vista em perspectiva de um guia de onda retangular fechado por uma placa em  $x = 0$ .

Para uma caixa retangular anteriormente definida, o comprimento de onda ressonante é dado pela Eq. (3.14), sendo a frequência de ressonância calculada como  $f = c/\lambda$ , onde  $c = 3 \times 10^8 m/s$ .

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{(l/x_1)^2 + (m/z_1)^2}} \quad (3.14)$$

Maiores detalhes sobre cavidades ressonantes podem ser vistos em (KRAUS, 1978).

## 4 *Resultados*

### 4.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados obtidos em uma série de experimentos propostos com o intuito de investigar mais detalhadamente o comportamento do campo eletromagnético nos ensaios de suscetibilidade eletromagnética. A idéia é adquirir um conhecimento gradual capaz de conduzir a uma compreensão geral do problema final, a partir da preparação, realização e, principalmente, a análise dos resultados de medição.

Os experimentos propostos são descritos a seguir, e podem ser divididos em três blocos básicos:

1. Caracterização da antena corneta *Model 3106*;
2. Medição de campo eletromagnético em campo aberto;
3. Realização de ensaios.

### 4.2 Caracterização da antena corneta *Model 3106*

Os experimentos de caracterização visam ao estudo do comportamento da antena em diferentes situações. A caracterização desta antena é fundamental, visto que será utilizada em todos os outros experimentos propostos (exceto no ensaio em carro completo, realizado em ELASIS). Todos os experimentos relacionados neste tópico foram realizados na CSA do LACE FIAT. A faixa de frequência observada varia entre 200 MHz e 1 GHz, visto ser esta a faixa de frequência recomendada para testes de imunidade irradiada em veículos. Os campos emitidos pela antena foram medidos com um medidor de campo isotrópico, a diferentes distâncias da antena, para as polarizações horizontal e vertical. Além da intensidade do campo elétrico, também será medido o VSWR em algumas situações. As diferentes situações de medição são descritas nas subseções seguintes.

### 4.2.1 Experimento 1.1 - Ambiente anecóico

O objetivo deste experimento foi a observação dos campos gerados pela antena em toda a faixa de frequência. Foram realizadas medições a diferentes distâncias da antena (0,5 m, 1,0 m e 1,4 m). De acordo com resultados apresentados em (SANTOS, 2007), podem ser verificados os diagramas de radiação desta antena, atestando sua diretividade. Dessa forma, ao longo deste trabalho serão verificadas apenas as medições realizadas ao longo do eixo de simetria da antena, no centro do disco de medição, conforme a Fig15. A potência de entrada da antena foi mantida constante ( $200\text{ W} \pm 0,2\text{ dB}$ ) em toda a faixa de frequência observada. A montagem utilizada para realização deste experimento pode ser vista na Fig 16.



Figura 15: Disco utilizado para suporte do medidor isotrópico.

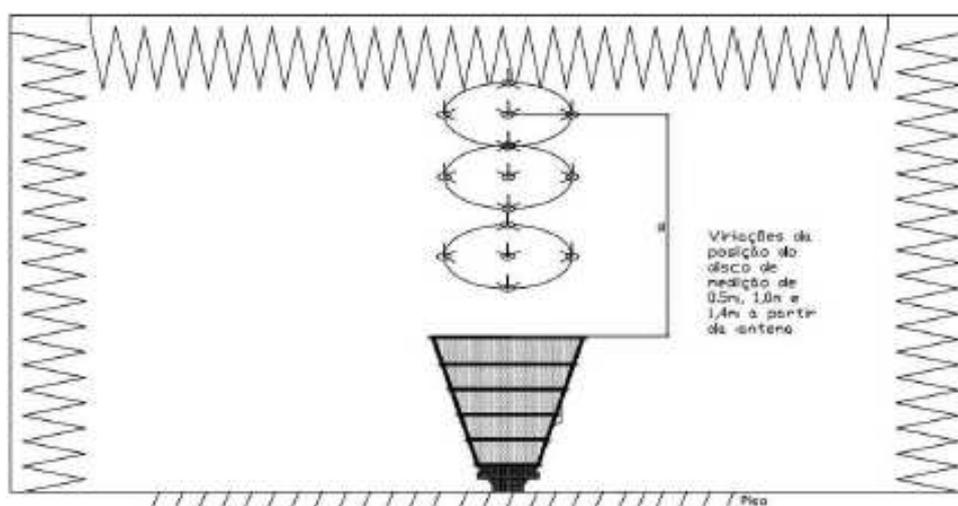


Figura 16: Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.1.

O campo elétrico medido para as diferentes distâncias pode ser visto na Fig. 17. Observa-se o decaimento do campo com o aumento da distância, conforme esperado. Porém, não se mantém a relação de proporcionalidade inversa entre campo e distância pois esta relação só é válida na região de campo distante. Todas as medições deste trabalho são realizadas na região de campo próximo, pois para a faixa de frequência utilizada a distância limite entre as regiões varia de 15 m a 3 m.

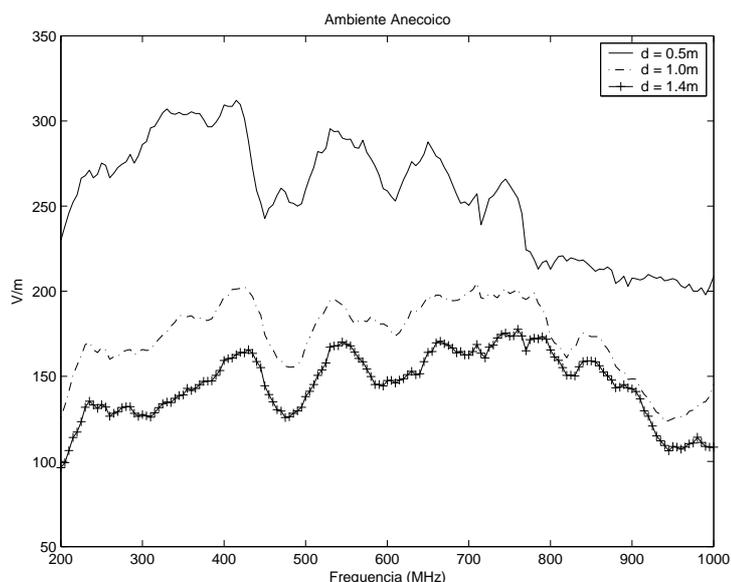


Figura 17: Campo elétrico medido no Experimento 1.1.

#### 4.2.2 Experimento 1.2 - Ambiente semi-aneecóico

O objetivo principal deste experimento é verificar a influência da reflexão do campo no plano de terra no campo elétrico medido a diferentes distâncias da antena e no VSWR do sistema. As distâncias de medição foram 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m, 2,0 m, 2,5 m e 3,0 m. O esquema de montagem utilizado pode ser visto na Fig. 18. A antena foi posicionada a uma altura de 1,0 m e sua parte posterior está distante 0,5 m do revestimento absorvedor da CSA. A potência de entrada da antena foi mantida constante ( $100\text{ W} \pm 0,2\text{ dB}$ ) em toda a faixa de frequência observada.

Ao verificar os campos medidos, observou-se que para algumas frequências, o campo medido a maiores distâncias era mais intenso que o medido para distâncias menores, conforme pode ser verificado na Fig. 19. Tal comportamento do campo foi atribuído às reflexões do campo no plano de massa da CSA. Assim, para minimizar os efeitos desta reflexão, foram realizadas medições com revestimento absorvedor no piso, colocado a 0,5 m de distância da abertura da antena, conforme Fig 20. Ao observar os campos medidos para

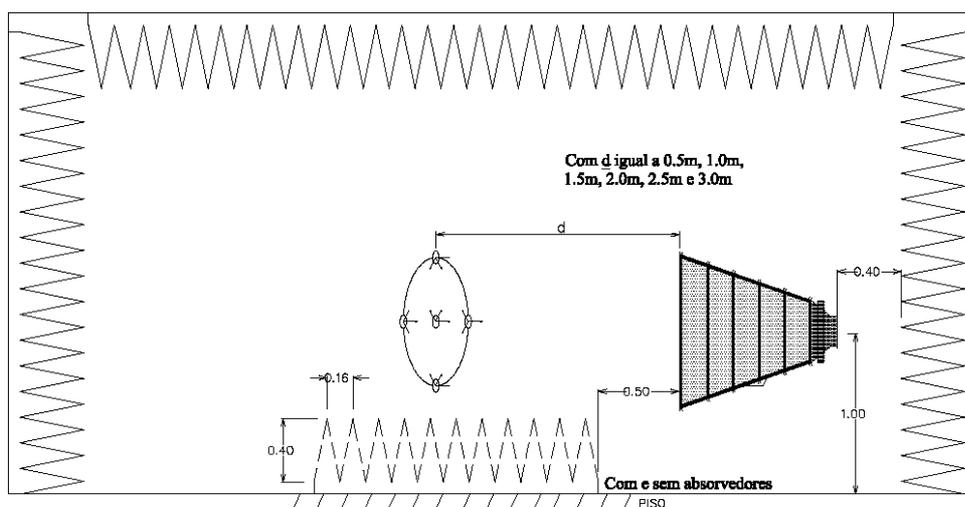


Figura 18: Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.2.

esta situação, percebe-se a diminuição do efeito de reflexão no solo através do decaimento do campo com o aumento da distância, em quase toda a faixa de frequência, conforme Fig. 21.

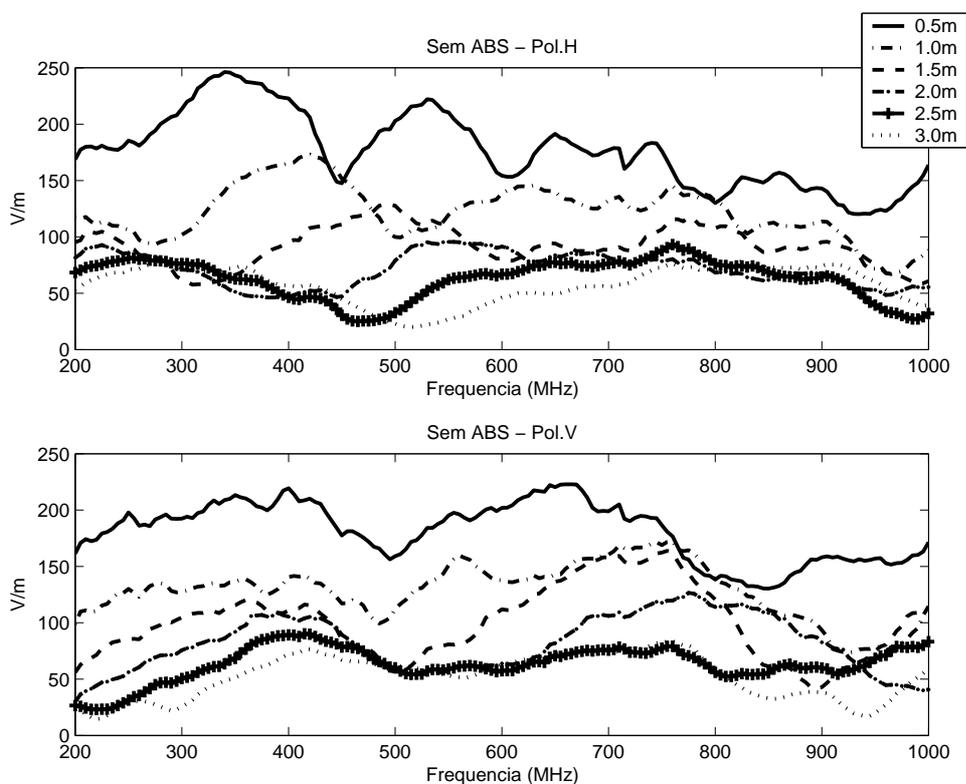


Figura 19: Campo elétrico medido para Experimento 1.2, sem absorvedores no solo.



Figura 20: Montagem utilizada para Experimento 1.2, com absorvedores no solo.

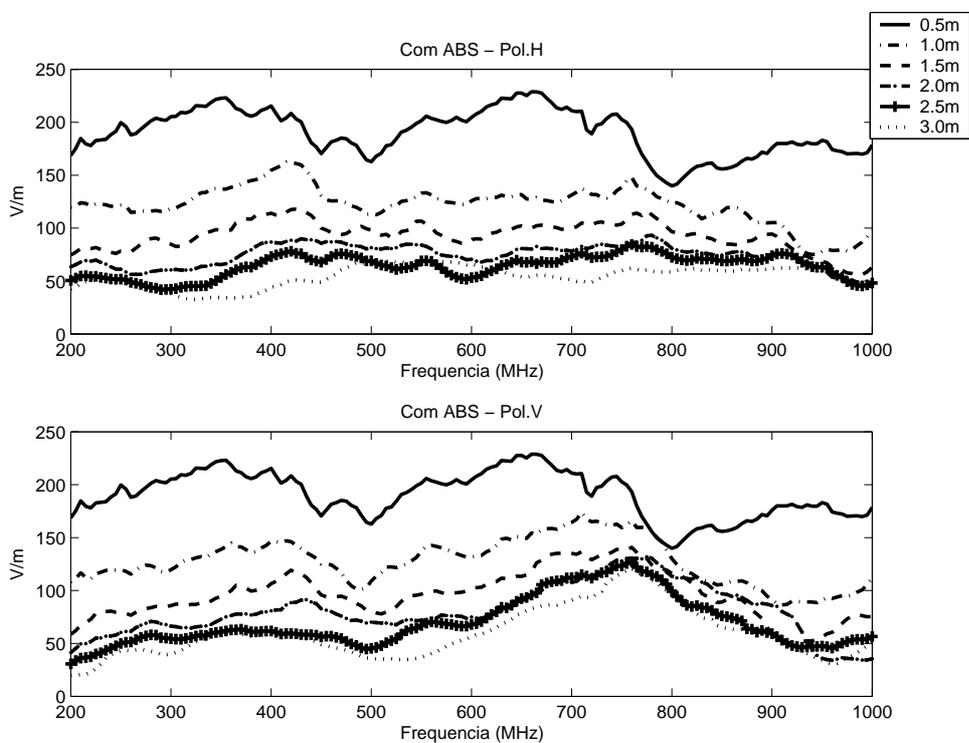


Figura 21: Campo elétrico medido para Experimento 1.2, com absorvedores no solo.

O fenômeno de reflexão do campo irradiado no plano de massa praticamente não interfere no VSWR do sistema. A variação média observada entre o VSWR medido sem absorvedores e com absorvedores foi de 6,5%, sendo os maiores valores de erro encontrados para  $f > 700MHz$ .

### 4.2.3 Experimento 1.3 - Propagação diante de um anteparo metálico bidimensional, em ambiente semi-aneecóico

O objetivo deste experimento é verificar o comportamento dos campos irradiados pela antena e do VSWR do sistema quando um anteparo é posicionado a diferentes distâncias da mesma. O anteparo escolhido foi uma chapa metálica de  $1\text{ m}^2$ , sendo que anteparo e antena foram mantidos a uma altura de  $1,0\text{ m}$ . A potência de entrada da antena foi mantida constante ( $100\text{ W} \pm 0,2\text{ dB}$ ) em toda a faixa de frequência observada. A montagem proposta pode ser vista na Fig. 22.

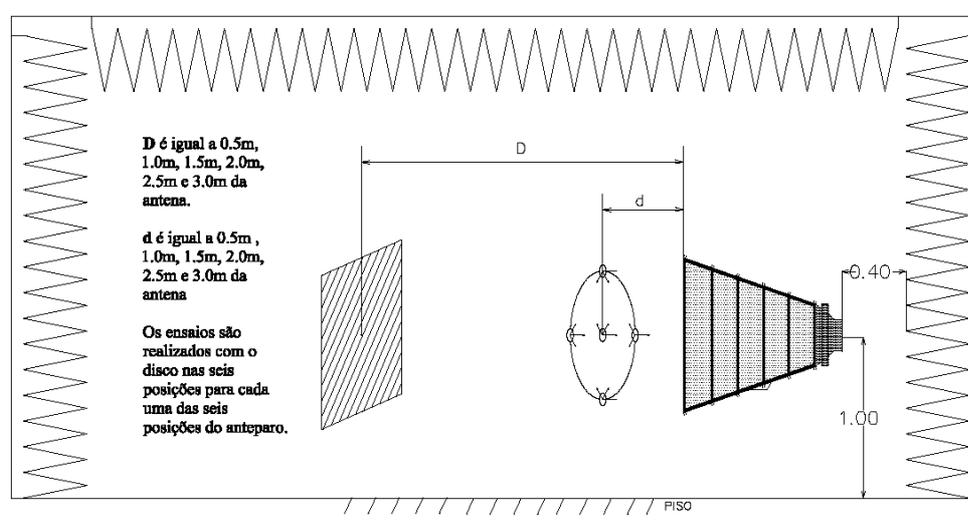


Figura 22: Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.3.

Inicialmente, verificou-se a influência da variação da distância entre a antena e o anteparo para um ponto de medição fixo. Na Fig. 23 são exibidos os pontos medidos a distância  $d = 0,5\text{ m}$  da antena. Quando o anteparo é posicionado a  $0,5\text{ m}$  de distância da antena, ocorre a saturação do medidor isotrópico devido ao elevado valor de campo, mas a intensidade do campo diminui com o aumento da distância. Para todas as distâncias é observado uma variação periódica do campo com a frequência, devido à reflexão do campo no obstáculo, gerando um padrão similar ao de uma onda estacionária. Em cada situação, o VSWR medido é comparado com um VSWR de referência, correspondente ao valor medido para esta montagem na ausência de anteparo. Observa-se na Fig. 24 a influência do anteparo no VSWR do sistema para cada uma das distâncias entre anteparo e antena, percebe-se que quanto mais distante o anteparo, menor sua influência no VSWR. Este comportamento é evidenciado na Fig. 25 pelo decaimento exponencial do erro médio em função da distância entre antena e anteparo.

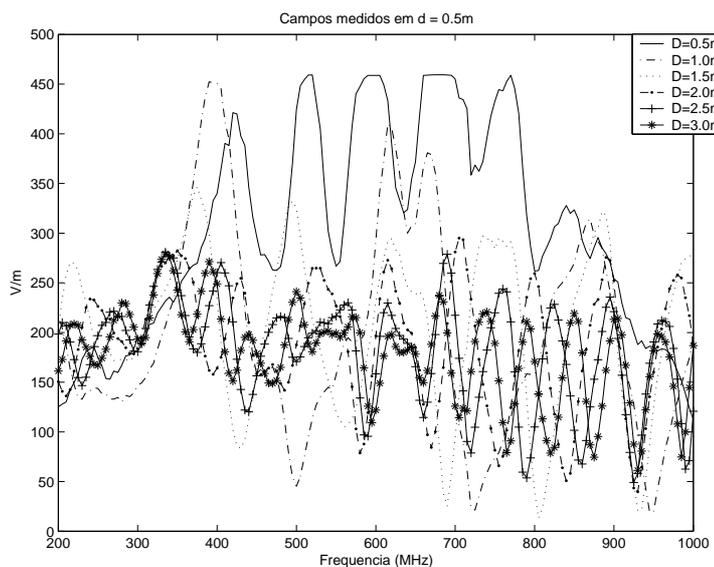


Figura 23: Campo elétrico medido para  $d = 0,5m$ .

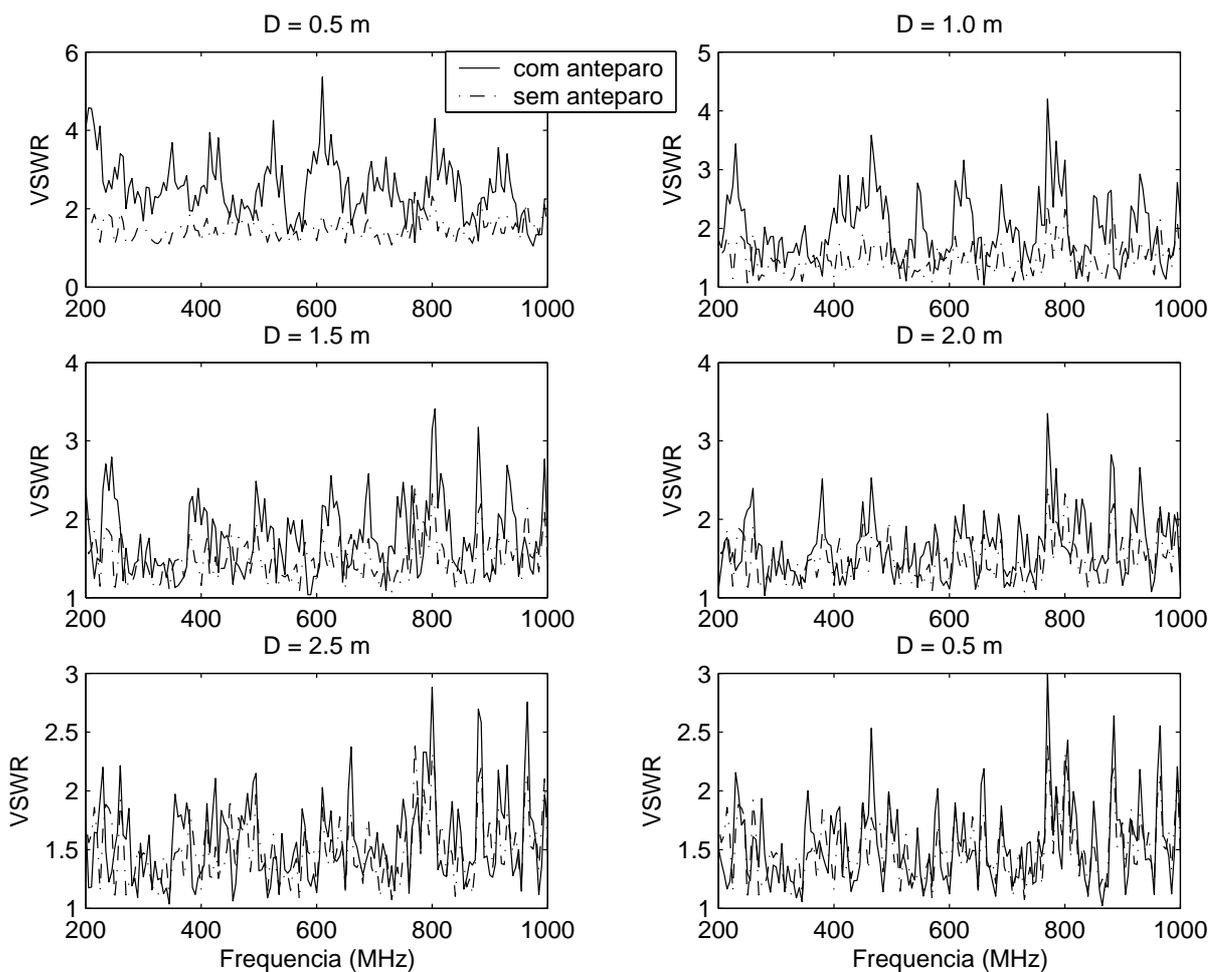


Figura 24: VSWR medido para diferentes distâncias entre antena e anteparo.

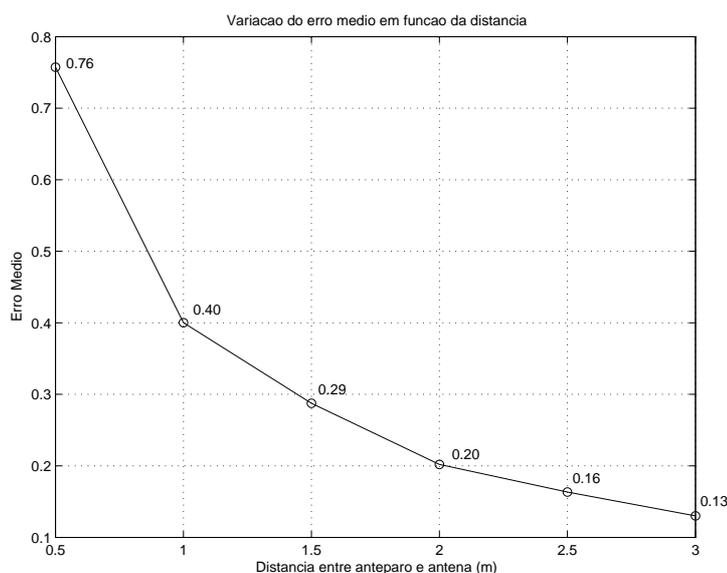


Figura 25: VSWR em função da distância entre anteparo e antena.

Outra observação importante a ser feita neste experimento, é o efeito de blindagem provocado pelo anteparo. Para isto, foram medidos os campos antes e depois do obstáculo. Na Fig. 26 são exibidos os campos medidos para o anteparo posicionado a 1,5 m de distância da antena emissora, sendo possível perceber claramente o efeito de blindagem do anteparo.

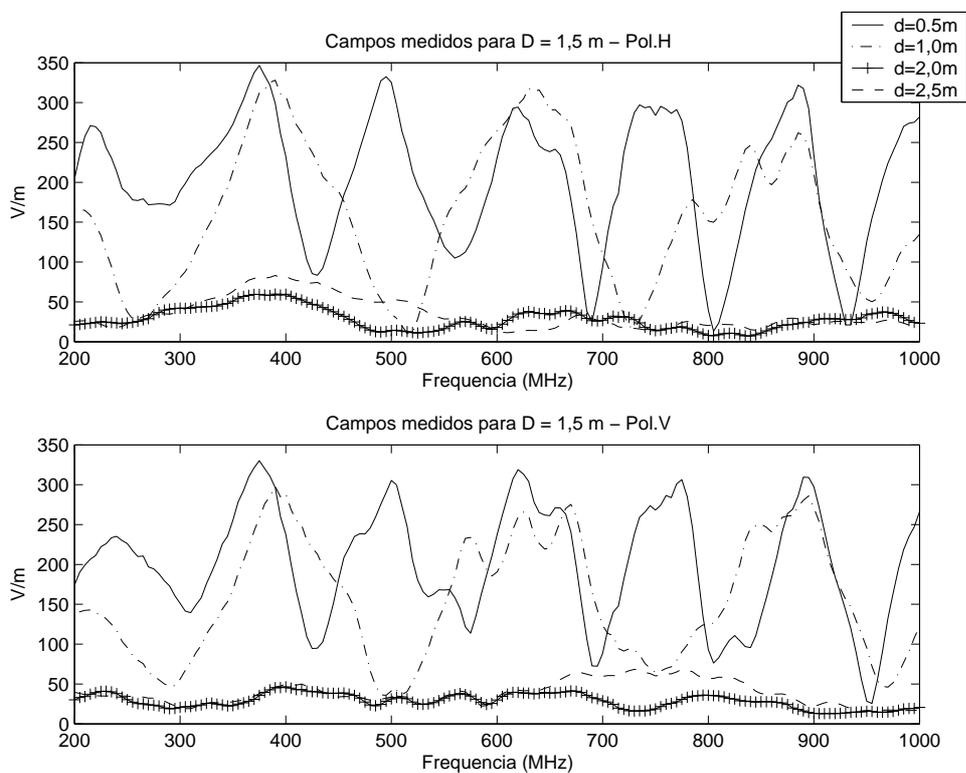


Figura 26: Campo elétrico para anteparo em  $D = 1,5$  m. Efeito de blindagem.

#### 4.2.4 Experimento 1.4 - Propagação diante de um anteparo metálico bidimensional perfurado, em ambiente semi-aneecóico

O objetivo deste experimento é investigar o efeito gerado no campo eletromagnético irradiado através de uma abertura, observando a variação da forma da abertura. É relevante também observar a correlação das dimensões da abertura com os efeitos observados no campo. As dimensões escolhidas para as fendas, são típicas das dimensões das principais aberturas encontradas na parte dianteira de um automóvel como por exemplo os faróis e a grade do radiador. A configuração do experimento foi a mesma da utilizada nos experimentos 1.4 e 1.3, para possibilitar a comparação dos resultados. Neste experimento, a distância entre anteparo e antena foi fixa em  $D = 1,5$  m. A Fig. 27 ilustra a montagem realizada. Foram utilizadas chapas metálicas de  $1\text{ m}^2$ , com diferentes tipos de aberturas, conforme a Fig. 28.

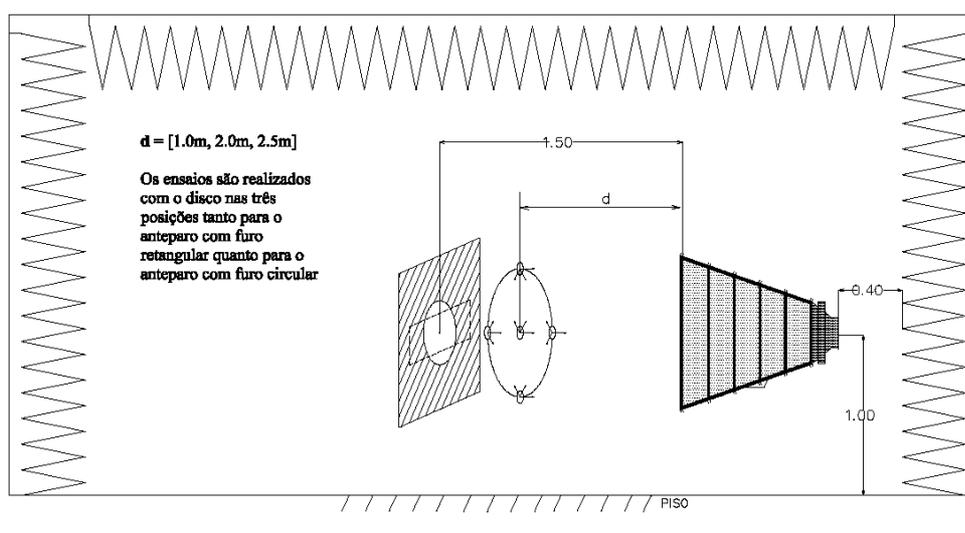


Figura 27: Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.4.

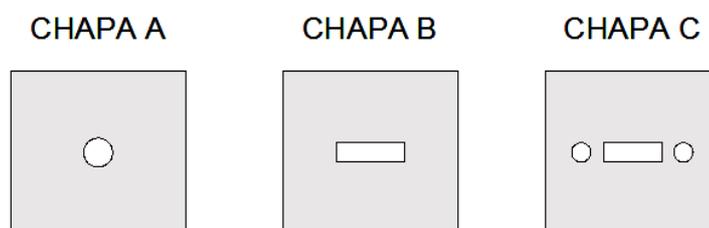


Figura 28: Tipos de aberturas utilizadas no Experimento 1.4.

Já na Fig. 29, é possível comparar o campo medido a diferentes distâncias para chapas com diferentes tipos de aberturas, sendo a Chapa D, a mesma chapa utilizada no experimento anterior, sem aberturas. Observa-se que os tipos de aberturas utilizadas têm pouca

influência sobre o campo medido após o anteparo, principalmente para as frequências mais baixas, devido ao elevado comprimento de onda. A similaridade entre os campos, apesar da variação das aberturas fica mais evidente ao se observar os erros obtidos, considerando o campo medido sem anteparo como referência, pode ser observada na Fig. 30.

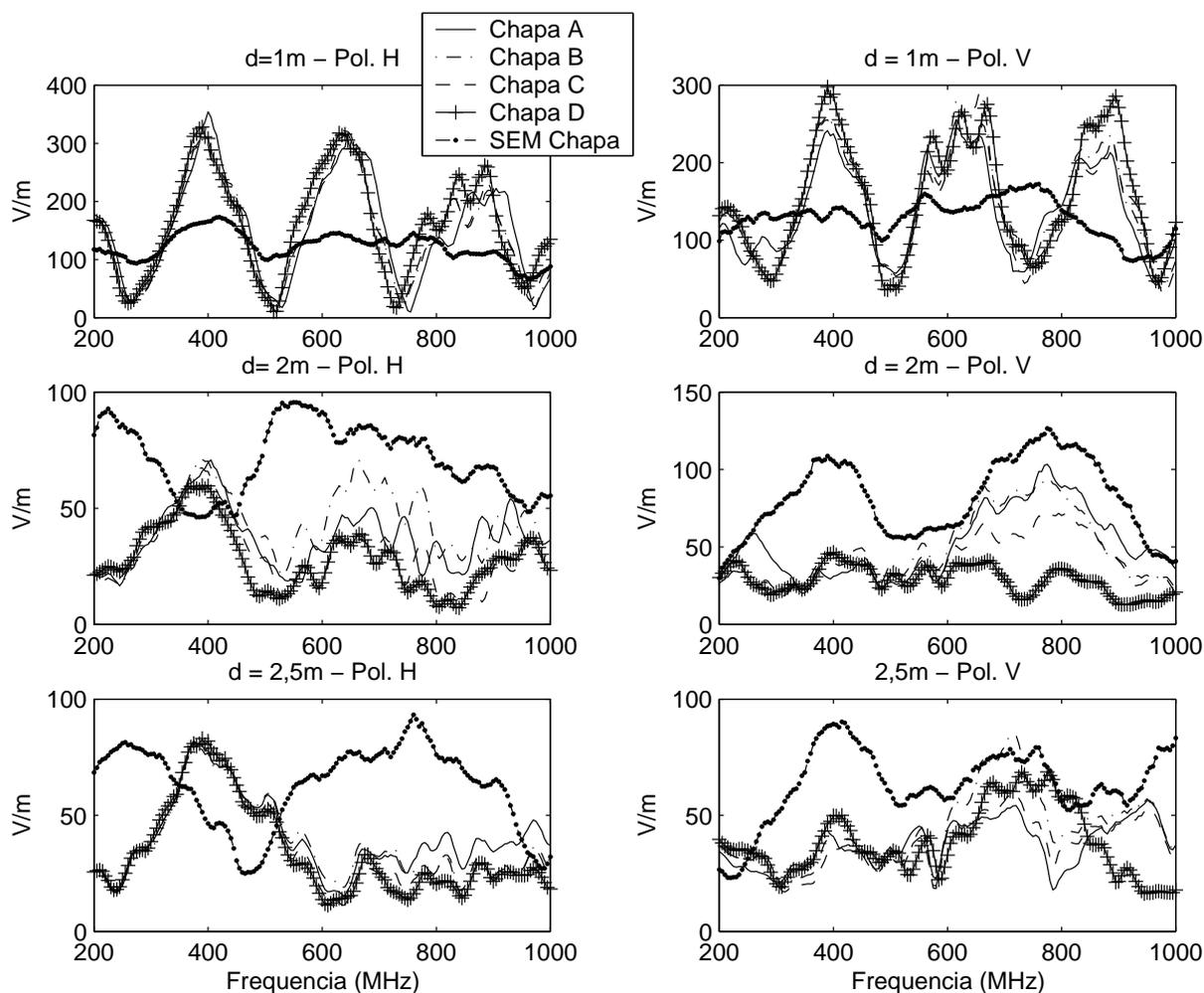


Figura 29: Campo elétrico medido para Experimento 1.4.

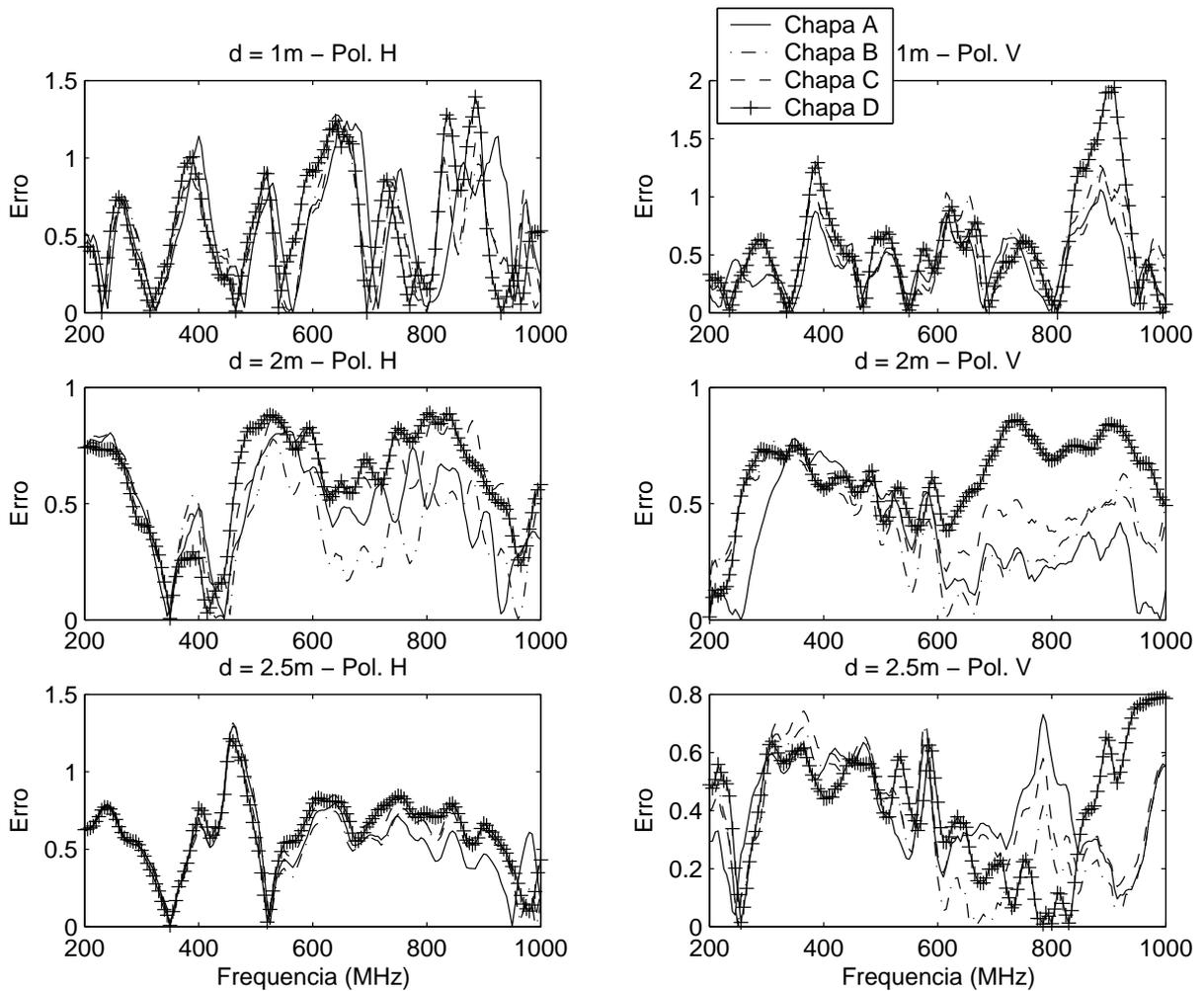


Figura 30: Erros obtidos considerando o campo medido sem anteparo como referência.

#### 4.2.5 Experimento 1.5 - Propagação diante de um anteparo metálico tridimensional, em ambiente semi-aneecóico

Este experimento foi projetado para, através de comparação com os dados obtidos nos experimentos anteriores, verificar o efeito de difração, interferência e reflexões no interior de uma caixa ressonante. Para tal, um cubo metálico, de 1 m de aresta, foi posicionado a 1,5 m da antena emissora, a 1,0 m de altura, conforme Fig. 31. A face frontal do volume é removível, permitindo que as chapas, com diferentes aberturas, utilizadas nos experimentos anteriores fossem alternadas, a fim de se verificar a influência de diferentes tipos de aberturas nas características do campo eletromagnético no interior da caixa.

A Fig. 32 apresenta os campos medidos para  $d = 1,0$  m, ponto externo à caixa, e para  $d = 2,0$  m, ponto interno à caixa. Diferentemente, do observado no experimento anterior, percebe-se que o formato da abertura influencia consideravelmente a forma do campo no interior da caixa. Para algumas frequências, ocorre o efeito de amplificação

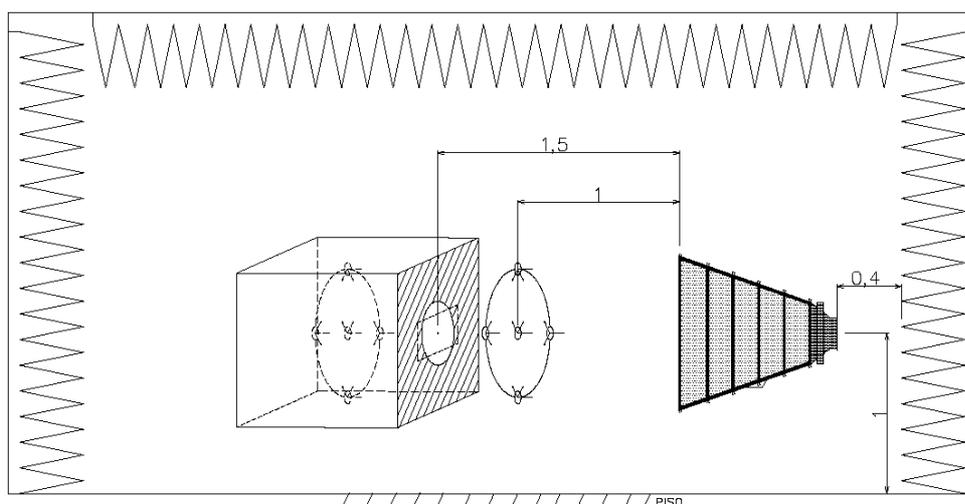


Figura 31: Esquema de montagem utilizada para Experimento 1.5.

do campo no interior da caixa. Como este efeito não foi verificado no Experimento 1.4, pode-se atribuí-lo principalmente às reflexões que ocorrem no interior da caixa, efeito típico de cavidades ressonantes. Já para uma grande parte das frequências, nas quais não ocorre o fenômeno de ressonância, fica evidente o efeito de blindagem do corpo metálico. De acordo com a Fig. 33 que apresenta a razão entre os campos medidos interna e externamente, o fenômeno de blindagem é predominante sobre o fenômeno de ressonância, porém este último quando ocorre provoca uma elevação considerável no campo, para algumas frequências, que poderia ser intolerável no caso de um ensaio de suscetibilidade eletromagnética, por exemplo.

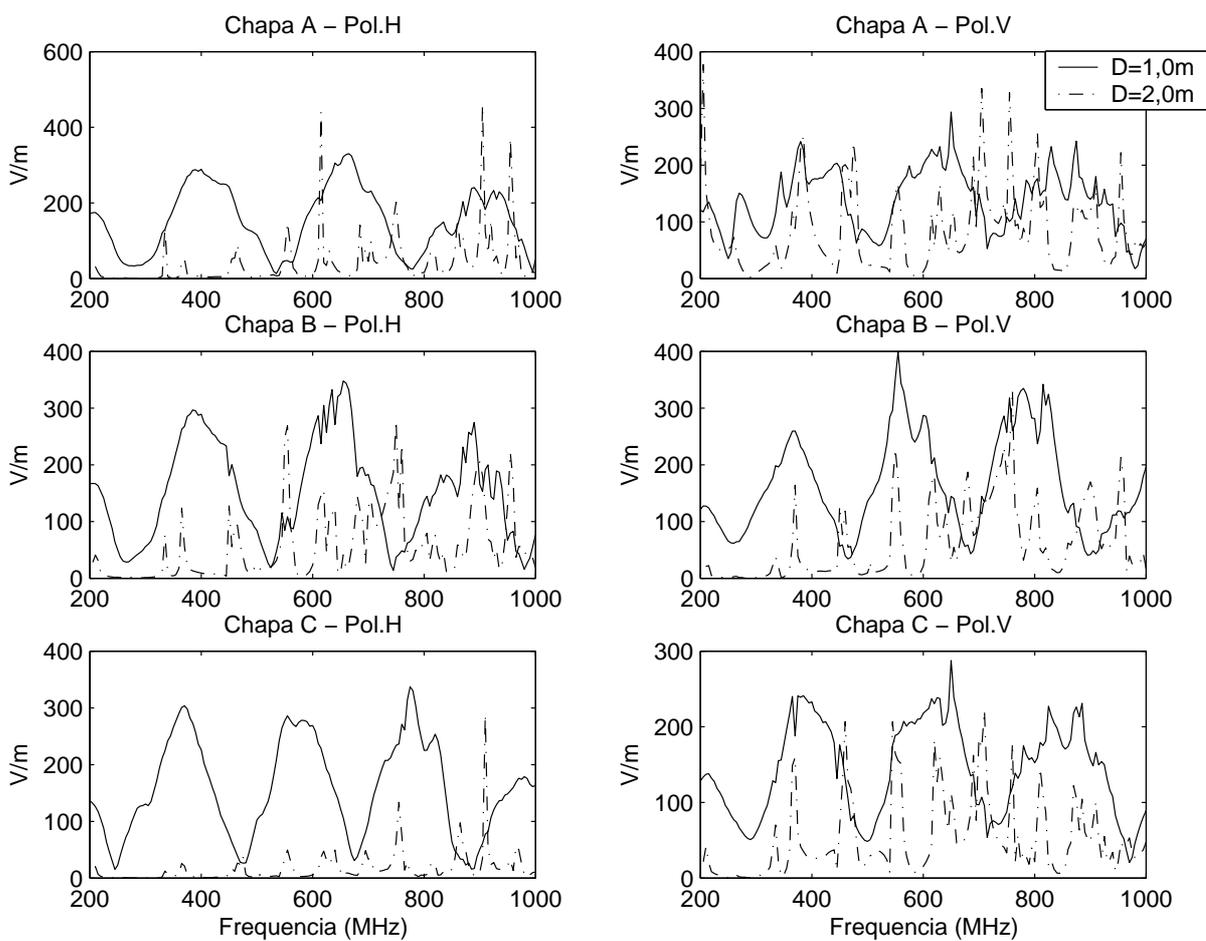


Figura 32: Campo elétrico medido no exterior e interior do volume.

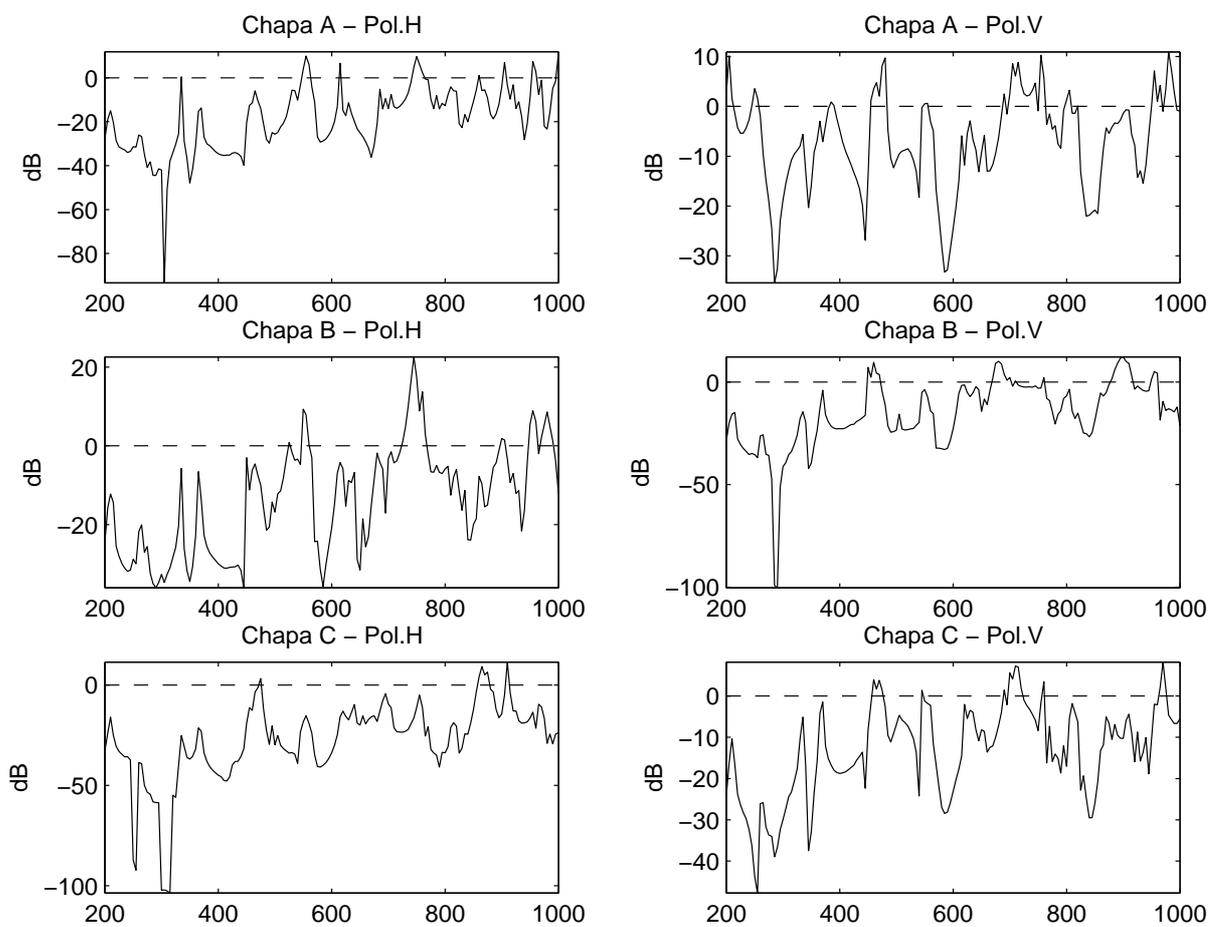


Figura 33: Razão entre os campos no interior e exterior do volume.

## 4.3 Medição de campo eletromagnético em campo aberto

Devido às dimensões da CSA do LACE FIAT, não é possível a realização de experimentos com veículos completos e protótipos de tamanho real no interior da mesma. Uma forma de superar esta limitação é a realização de experimentos em um campo de teste aberto.

Nessa série de experimentos é proposto um estudo comparativo entre os campos medidos no interior de protótipos e veículos. Como o estudo é comparativo, a intensidade do campo irradiado só precisa ser a mesma em todos os casos, não importando o seu valor absoluto. Assim, para as medições realizadas em campo aberto, foi utilizada potência de entrada da antena de  $30W \pm 2dB$ , constante para toda faixa de frequência utilizada. A redução na potência foi necessária para evitar danos às pessoas presentes e evitar interferência eletromagnética nos equipamentos utilizados, visto que o ambiente não possuía blindagem. A antena corneta *Model 3106* foi utilizada em todos os experimentos, exceto no Experimento 4.6, realizado em ELASIS, na Itália.

O local escolhido para realização dos ensaios em campo aberto, foi o LEAT (*Laboratório de Extra Alta Tensão*), na UFMG. Seguindo as recomendações da norma CISPR 16 para construção de um OATS, foi definida uma elipse de medição sobre um plano de massa de 5 m x 10 m. Para validação do ambiente de medição montado, foi realizada uma calibração com os valores de campo medidos no interior da CSA, para as mesmas condições de montagem. Observou-se a presença de ruído de alta frequência nos campos medidos no OATS, devido principalmente às características intrínsecas da instalação e ao aumento da relação sinal ruído, por utilização de menor nível de potência do campo emitido. O erro médio obtido entre as medidas realizadas nos dois ambientes foi de 1 dB, após a filtragem do sinal medido no OATS, o que torna válida todas as demais comparações realizadas entre experimentos realizados nos dois ambientes. Vale ressaltar, que devido aos diferentes níveis de potência utilizados, os valores dos campos medidos foram normalizados antes das comparações realizadas. O estudo detalhado sobre a comparação entre medições realizadas nos ambientes distintos e a validação do OATS montado no LEAT pode ser visto em (SANTOS, 2007).

A forma dos protótipos construídos foi determinada levando-se em consideração a similaridade com um veículo real e o grau de simplificação adequado para realização de simulações numéricas, como as apresentadas em (ADRIANO, 2007). Os protótipos

utilizados nos experimentos são similares as apresentados na Fig. 34, sendo suas dimensões máximas compatíveis com as dimensões de um veículo real.

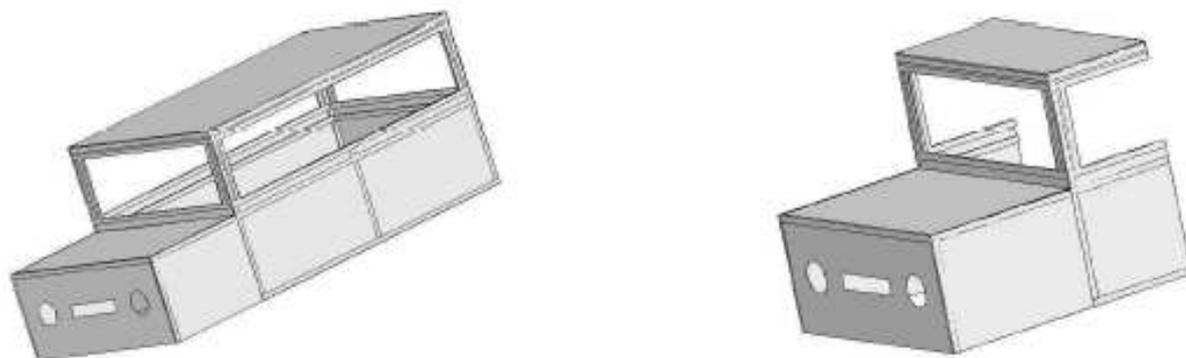
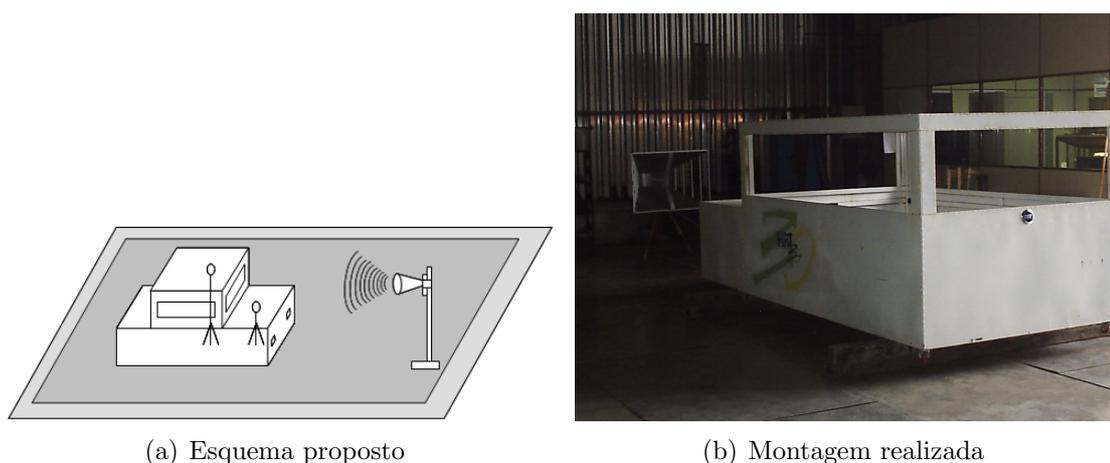


Figura 34: Esquemas de protótipos utilizados nos Experimentos 2.1 e 2.2

### 4.3.1 Experimento 2.1 - Protótipo de carro inteiro

Neste experimento foi avaliada a influência da variação de distância entre antena e carro, nos campos medidos no interior de um protótipo representando um veículo inteiro. O protótipo, colocado sobre um plano condutor, é iluminado pelo campo eletromagnético gerado pela antena emissora, conforme a Fig. 38.



(a) Esquema proposto

(b) Montagem realizada

Figura 35: Experimento 2.1 - Protótipo de carro inteiro.

Foram realizadas medições com o protótipo posicionado a 1,5 m e a 3,0 m de distância da antena emissora, para diversas posições no compartimento do motor e no interior do veículo. Na Fig. 36 são exibidos os valores de campo elétrico medidos em uma determinada

posição no vão do motor e em outra posição escolhida no interior do veículo, representado o painel. São apresentados os valores para polarização horizontal e vertical do campo emitido.

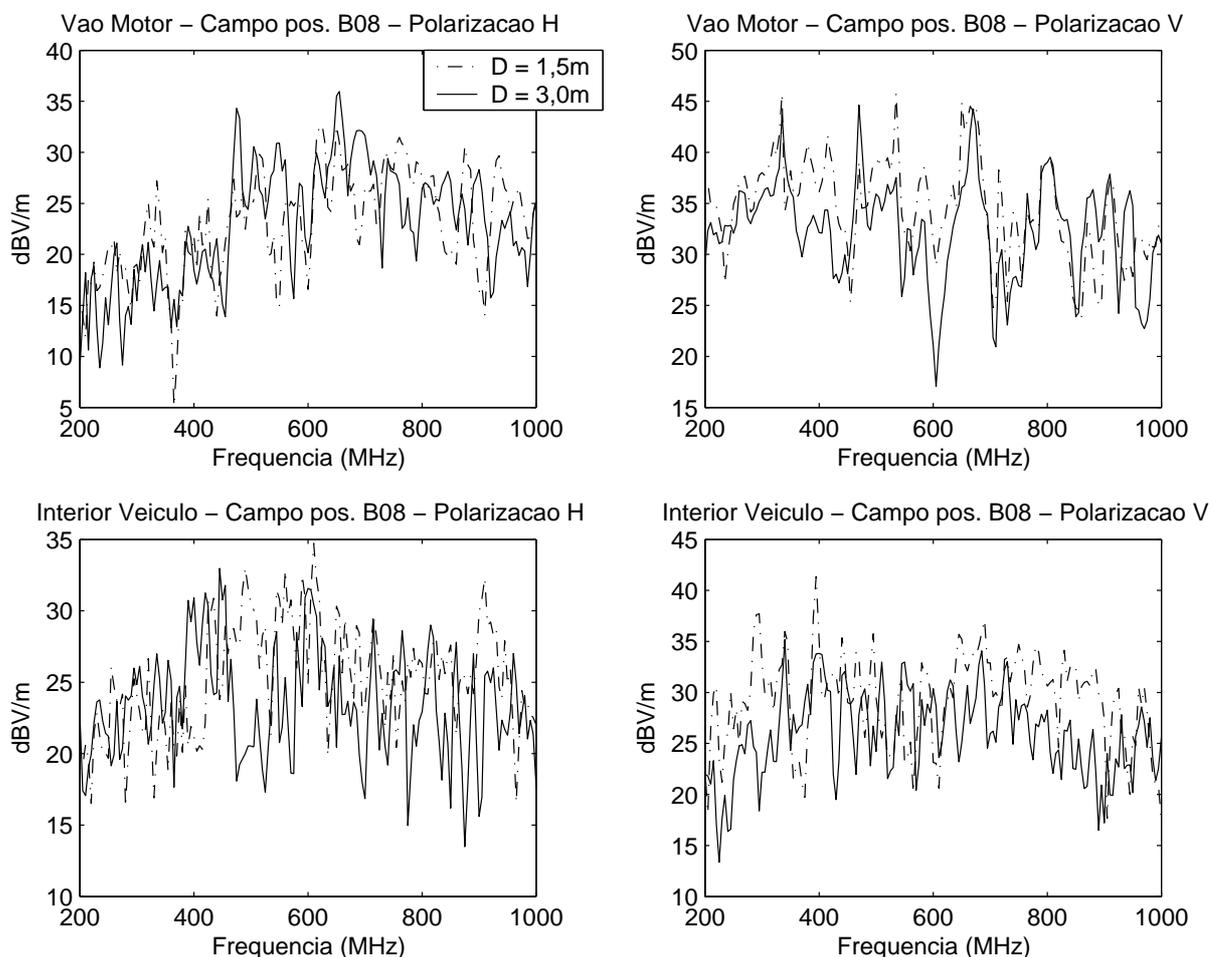


Figura 36: Campos medidos para protótipo inteiro.

Observa-se que há forte similaridade entre os campos medidos apesar da variação da distância. Tal similaridade pode ser expressa de forma numérica a partir do resultado da função coerência entre os sinais medidos. Os valores encontrados podem ser vistos na Tabela 10, lembrando que para dois sinais idênticos o resultado é 1,0.

Tabela 10: Máximo da função coerência para protótipo inteiro

Localização	Polarização H	Polarização V
Vão Motor	0,85	0,92
Interior Veículo	0,84	0,87

Foi calculado também o erro entre os campos medidos a diferentes distâncias, conforme Fig. 37, na qual PFF, representa o percentual de pontos fora dos limites de tolerância.

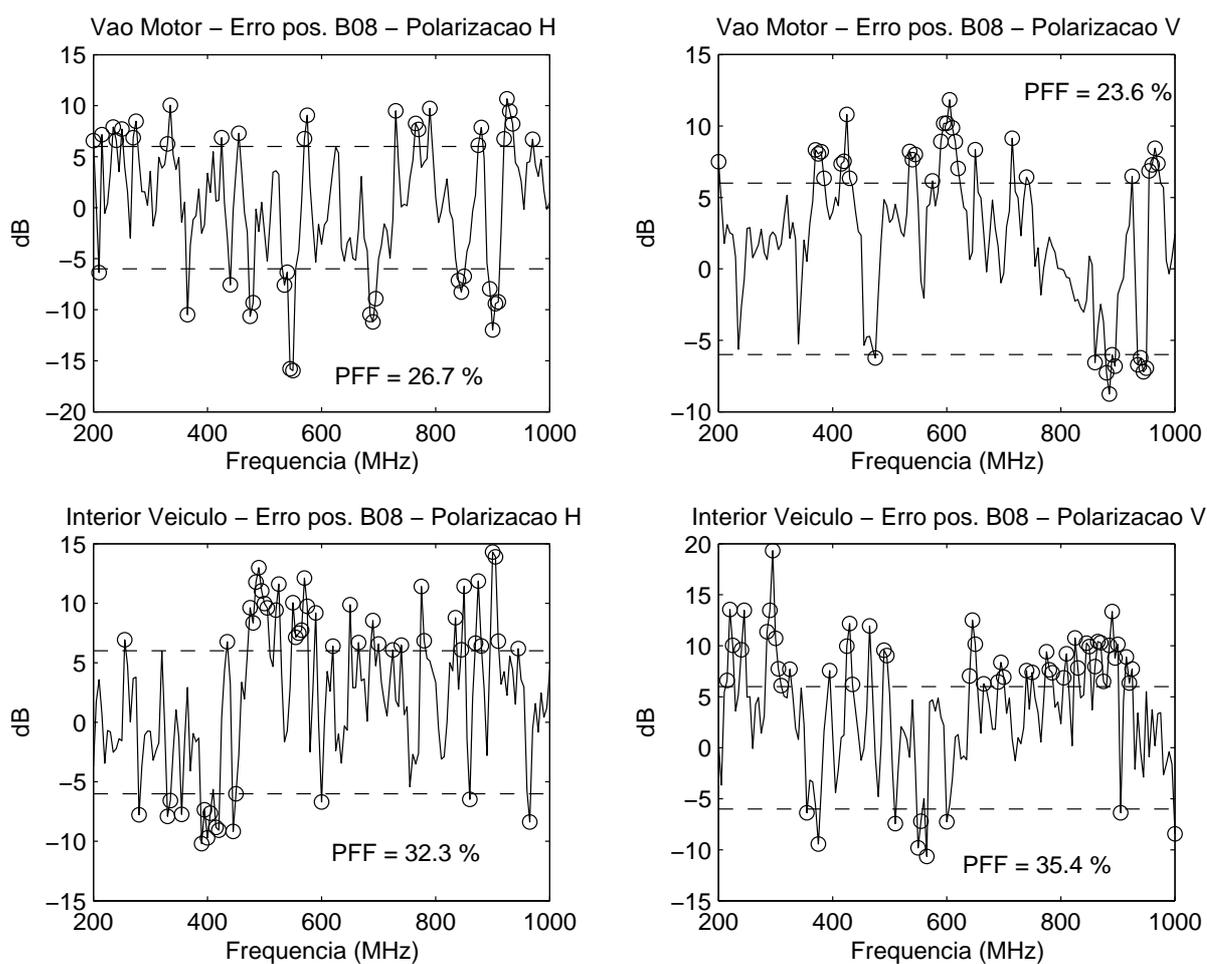


Figura 37: Erros calculados para protótipo inteiro.

Para avaliação do erro encontrado foi considerada uma faixa de  $\pm 6$  dB considerando o critério de uniformidade de campo definido em (IEC, 2006) que considera a tolerância de 6 db a mínima possível de ser alcançada, na prática em montagens experimentais. Esta norma cita ainda, que flutuações estatísticas na intensidade de campo, devidas às reflexões nas paredes, chão e teto são desta ordem de grandeza. O campo é considerado uniforme, segundo a referida norma, se pelo menos 75% dos valores medidos encontram-se dentro da faixa de tolerância.

### 4.3.2 Experimento 2.2 - Protótipo de carro cortado

Para realização deste experimento foi utilizada a montagem apresentada na Fig. 38(a) com os mesmos parâmetros adotados no experimento 2.1, utilizando-se o protótipo cortado. Uma foto da montagem realizada pode ser vista na Fig. 38(b).

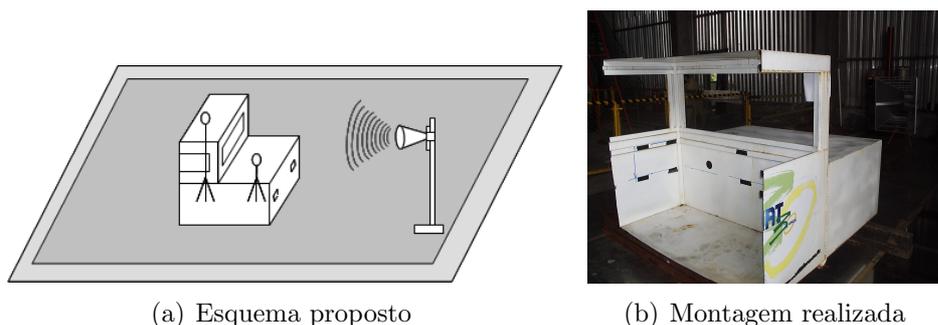


Figura 38: Experimento 2.2 - Protótipo de Carro Cortado

Assim como no Experimento 2.1, o objetivo inicial é verificar a influência na variação da distância nos campos medidos no interior do protótipo. Os campos medidos podem ser vistos na Fig. 39.

Mais uma vez é possível verificar similaridade entre os campos medidos, evidenciada pelos valores encontrados para a função coerência, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Máximo da função coerência para protótipo cortado

Localização	Polarização H	Polarização V
Vão Motor	0,85	0,92
Interior Veículo	0,92	0,96

É interessante notar que para os campos medidos no interior do veículo cortado, a função coerência é maior que para o carro inteiro, provavelmente porque como no protótipo cortado não há a influência das reflexões que ocorrem nas paredes do veículo. Os erros calculados podem ser vistos na Fig.40.

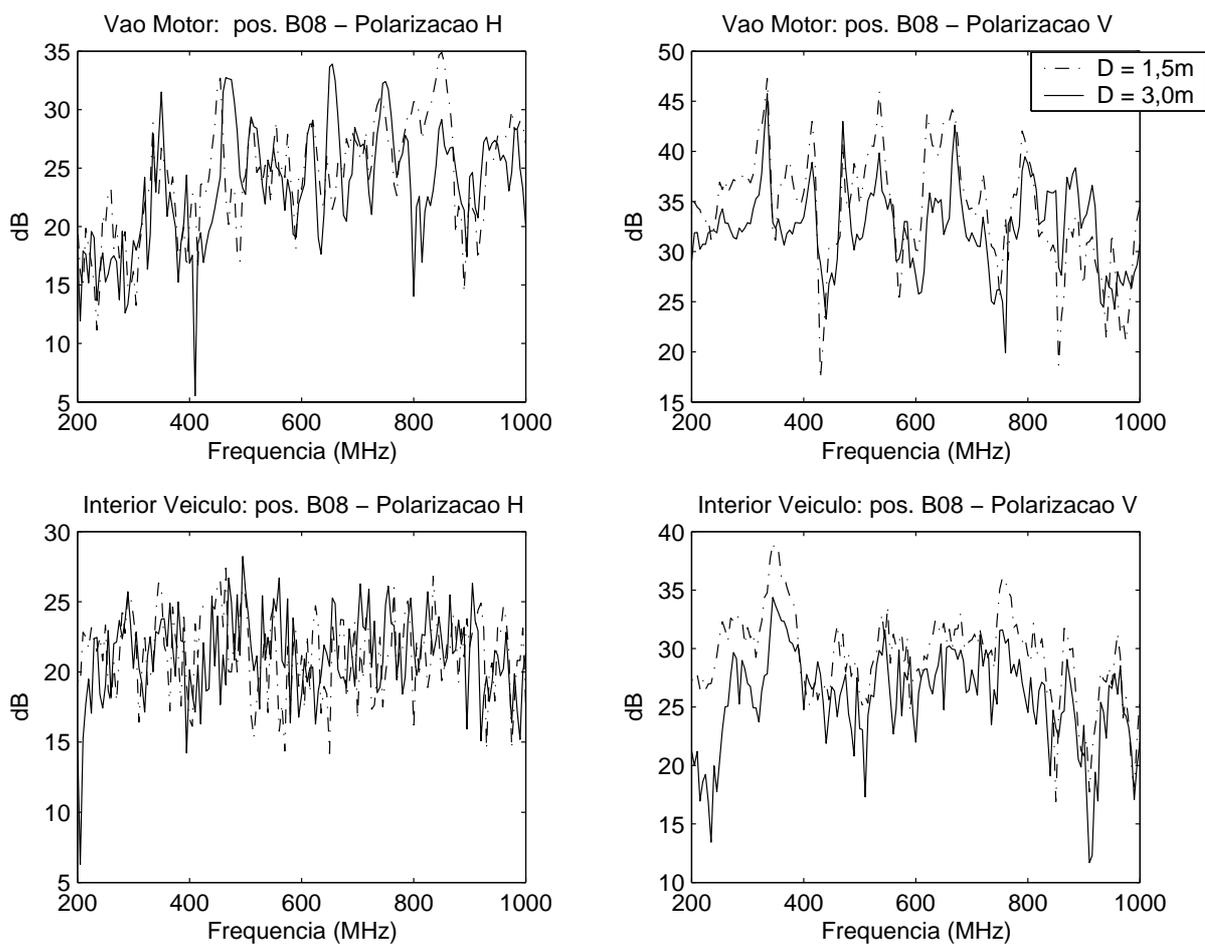


Figura 39: Campos medidos para protótipo cortado.

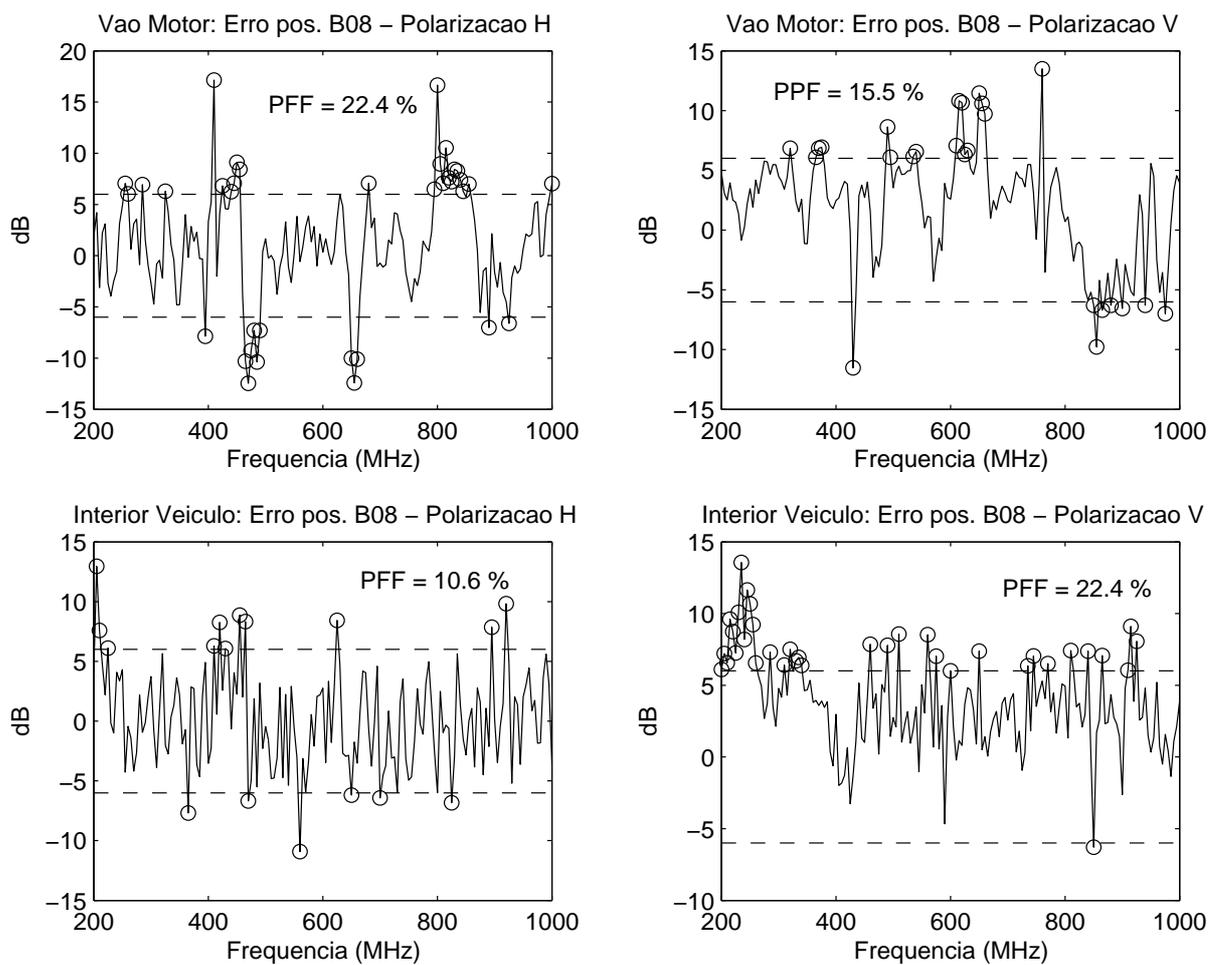


Figura 40: Erros calculados para protótipo cortado.

### 4.3.3 Verificação da influência do corte no protótipo

Para verificação da influência do corte no protótipo, foram comparados os campos medidos para distância de 3,0 m entre antena e veículo.

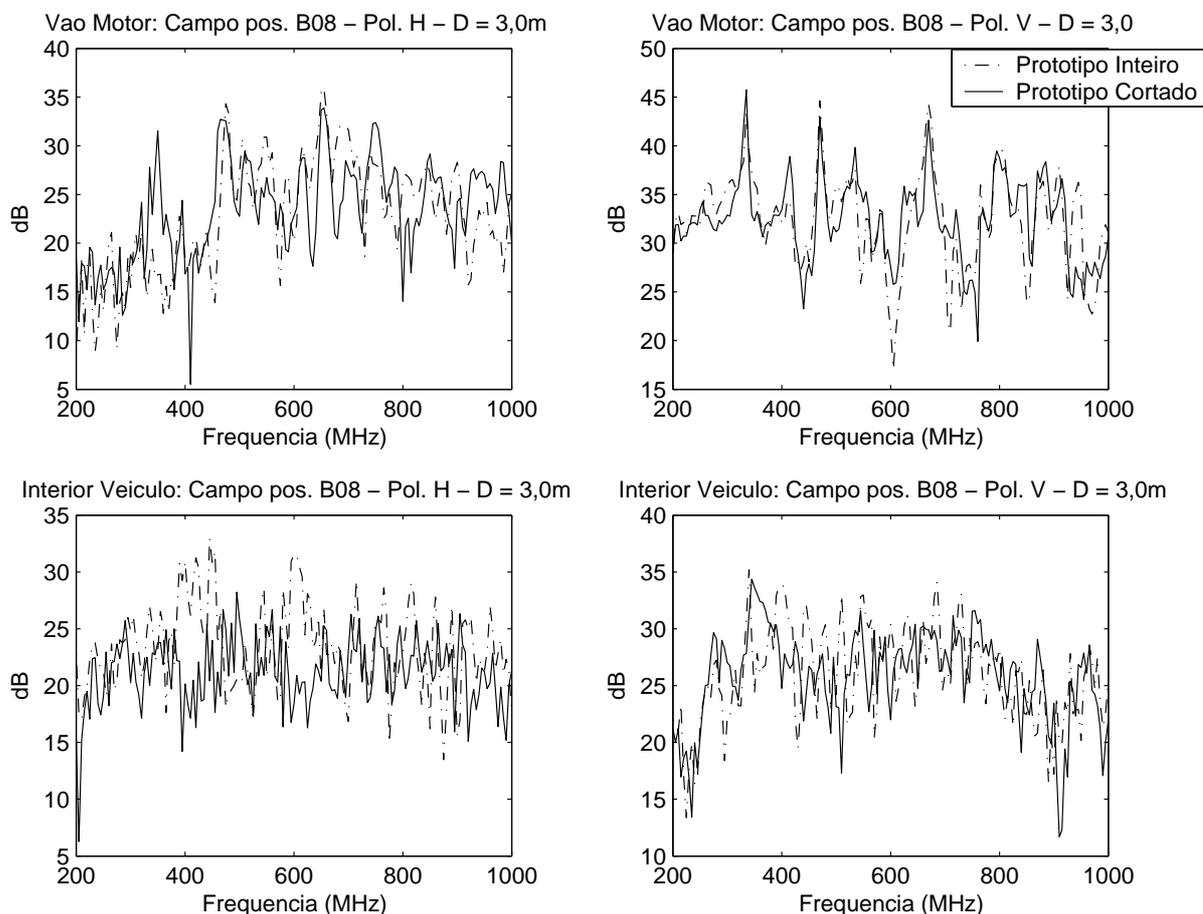


Figura 41: Comparação entre campos medidos para protótipo inteiro e cortado - D = 3,0 m.

Tabela 12: Máximo da função coerência para comparação protótipo inteiro x cortado

Localização	Polarização H	Polarização V
Vão Motor	0,89	0,95
Interior Veículo	0,84	0,89

De acordo com os resultados apresentados, percebe-se que a influência do corte é mais perceptível para polarização horizontal.

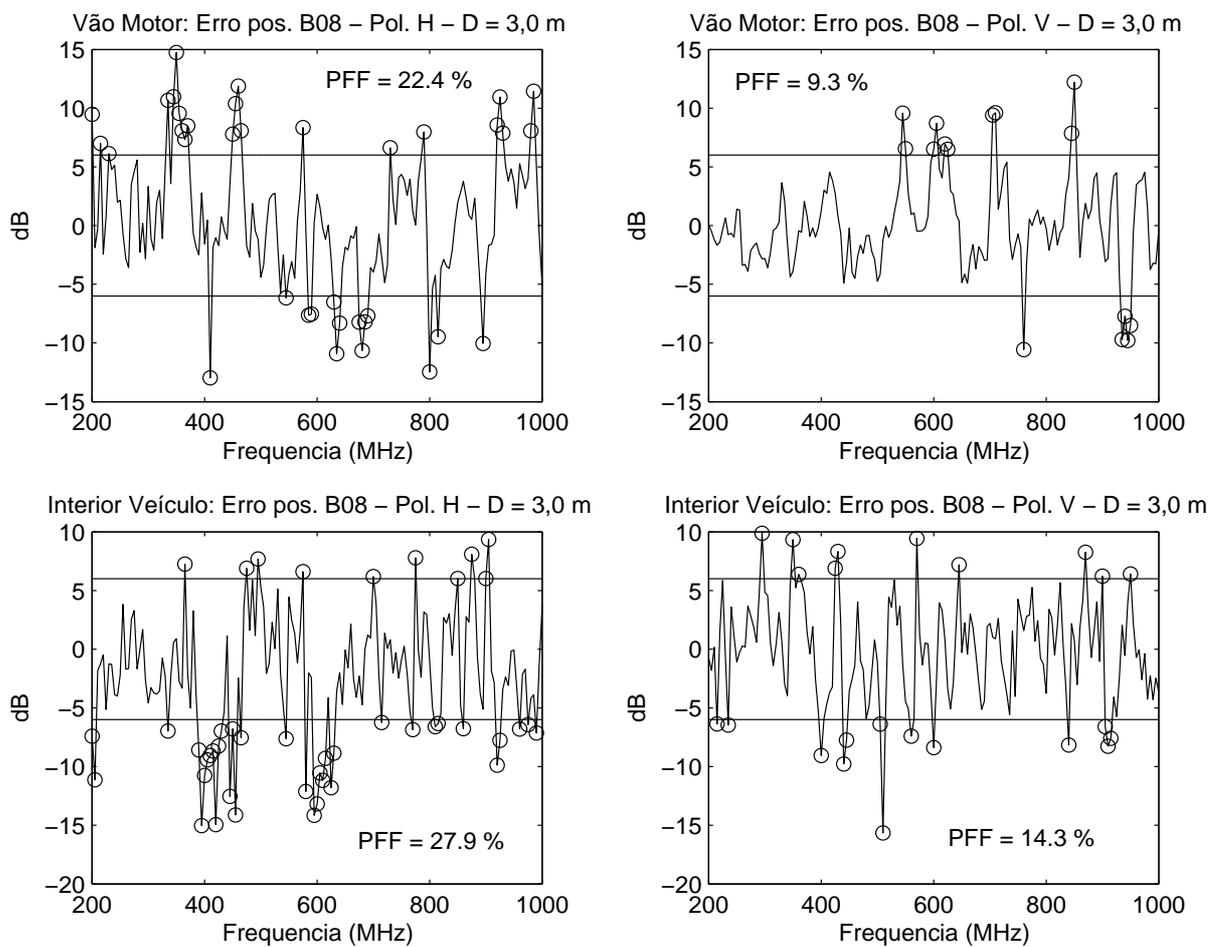


Figura 42: Erros calculados entre protótipo inteiro e cortado - D = 3,0 m.

#### 4.3.4 Experimento 2.3 - Veículo inteiro

O objetivo deste experimento é verificar a influência da variação da distância no campo eletromagnético medido no interior do mesmo, conforme montagem mostrada na Fig. 43. Foram realizadas medições em diferentes pontos do interior do veículo conforme a Fig. 44, para distâncias de 1,5 m e 3,0 m entre carro e antena emissora.

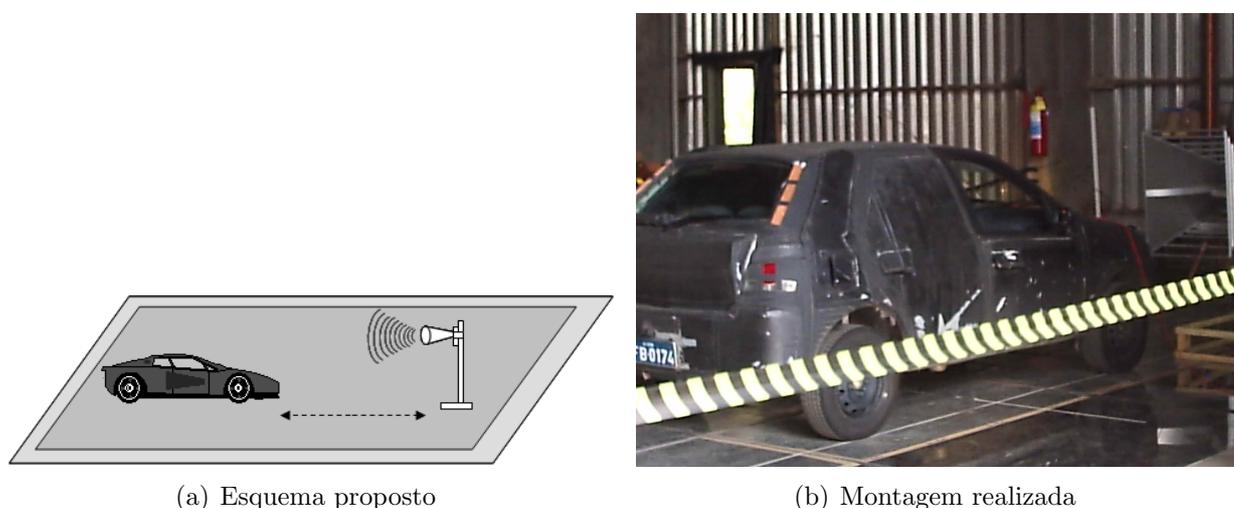


Figura 43: Experimento 2.3 - Medição de campo eletromagnético no interior do veículo inteiro.

Nesta seção serão apresentados os resultados encontrados para o Quadro de Instrumentos e Rádio, pois são locais com elevada concentração de componentes eletrônicos sujeitos a interferência eletromagnética. Os campos medidos podem ser vistos na Fig. 45.

A Tabela 13 apresenta os resultados da função coerência para as medidas realizadas. Pode-se observar que os valores obtidos são maiores que os encontrados para as medições realizadas no protótipo, fato atribuído às diferenças construtivas dos dois objetos. O erro encontrado pode ser visto na Fig. 46, onde é possível observar a dispersão dos pontos em relação à margem de tolerância adotada.

Tabela 13: Máximo da função coerência para veículo inteiro

Localização	Polarização H	Polarização V
Quadro Instrumentos	0,88	0,93
Radio	0,94	0,94

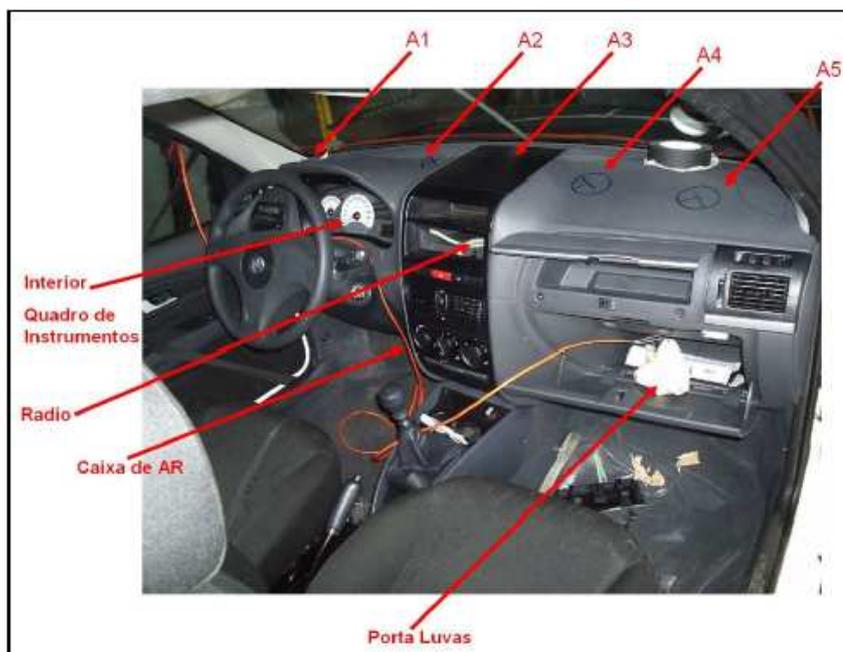


Figura 44: Pontos de medição no interior do veículo.

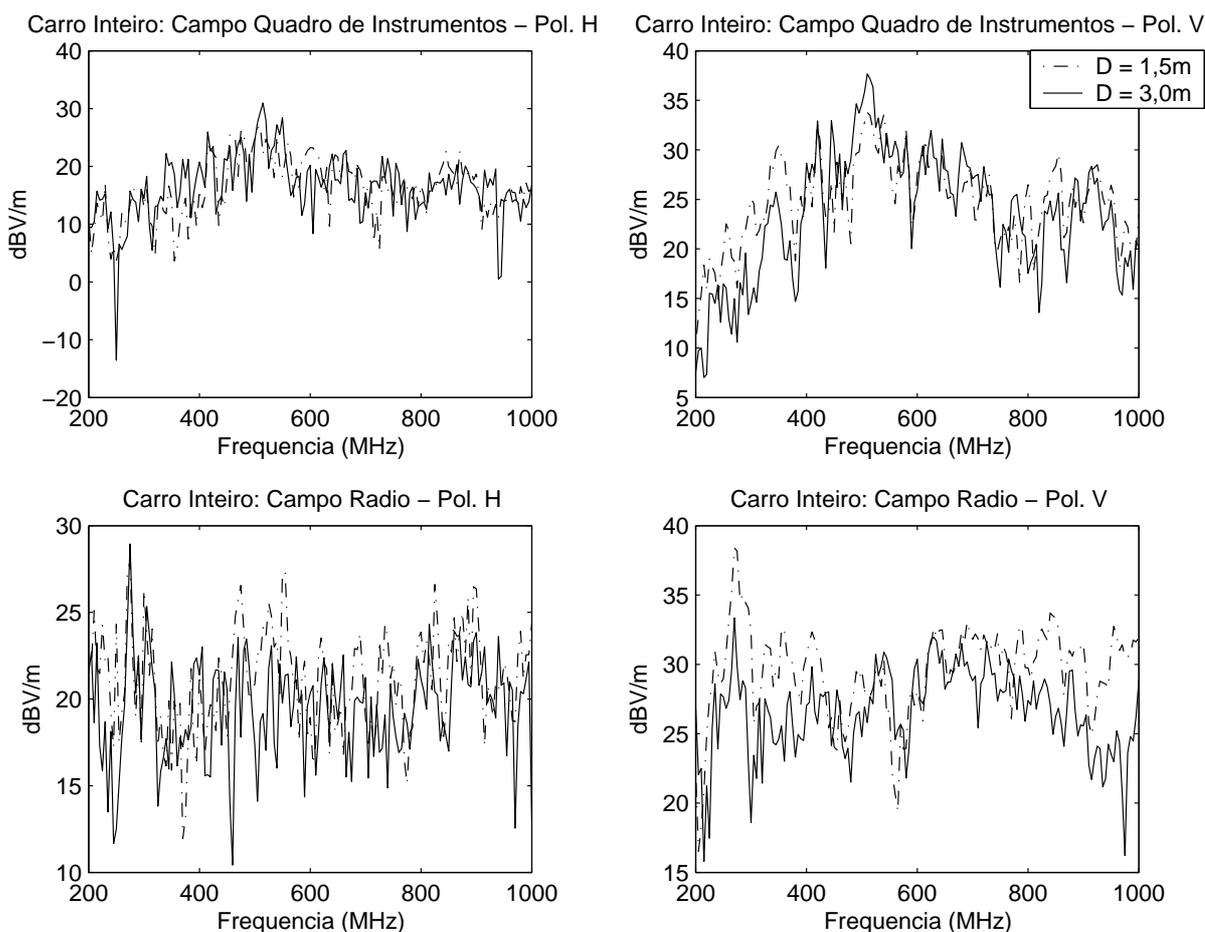


Figura 45: Campos medidos no interior do veículo a diferentes distâncias.

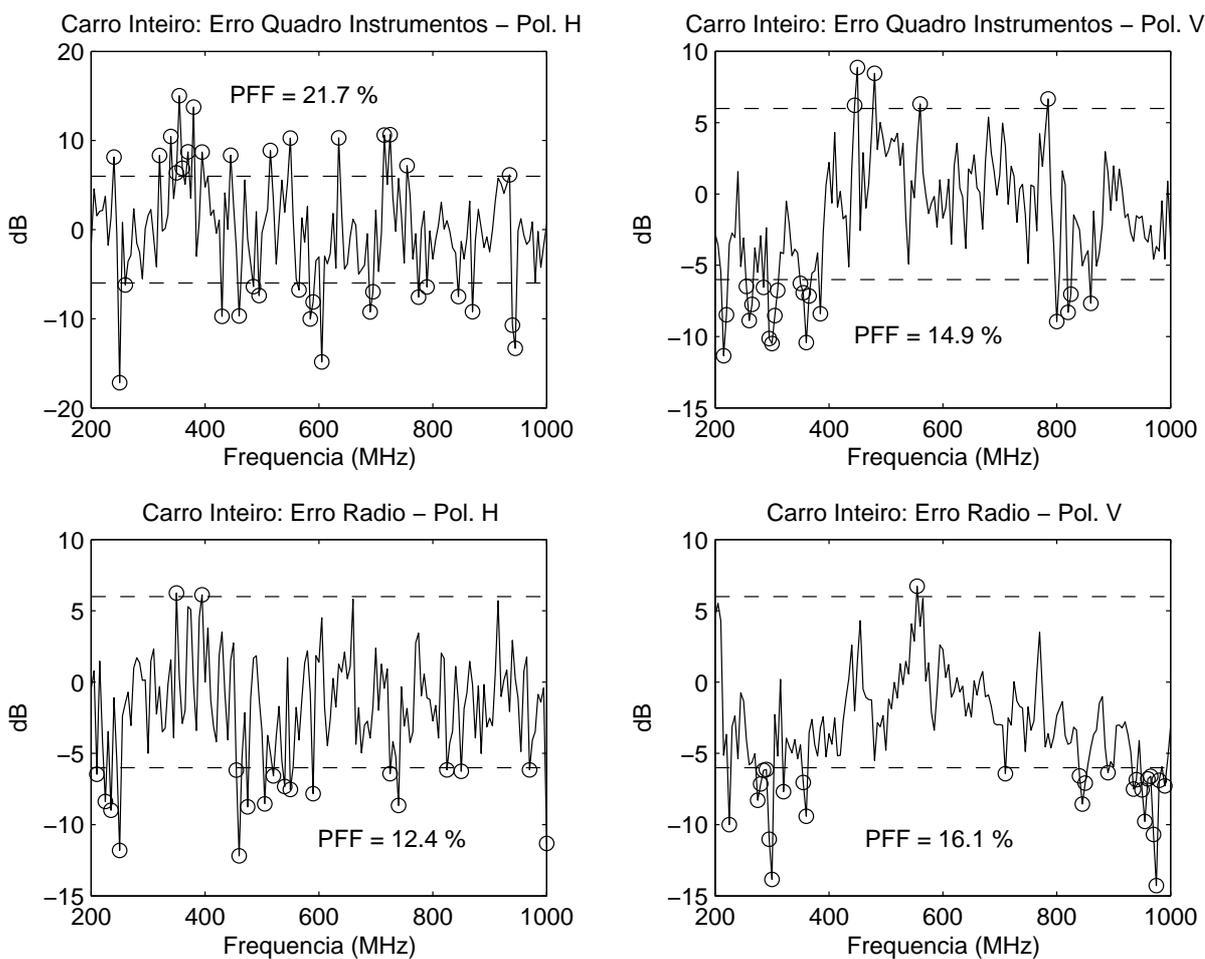


Figura 46: Erros calculados para veículo inteiro em diferentes distâncias.

### 4.3.5 Experimento 2.4 - Veículo cortado

Neste experimento, o objetivo é avaliar a variação de distância entre a antena emissora e o veículo cortado, conforme proposição da nova metodologia de ensaios. O esquema de montagem proposto e o veículo cortado utilizado no experimento podem ser vistos na Fig. 47.

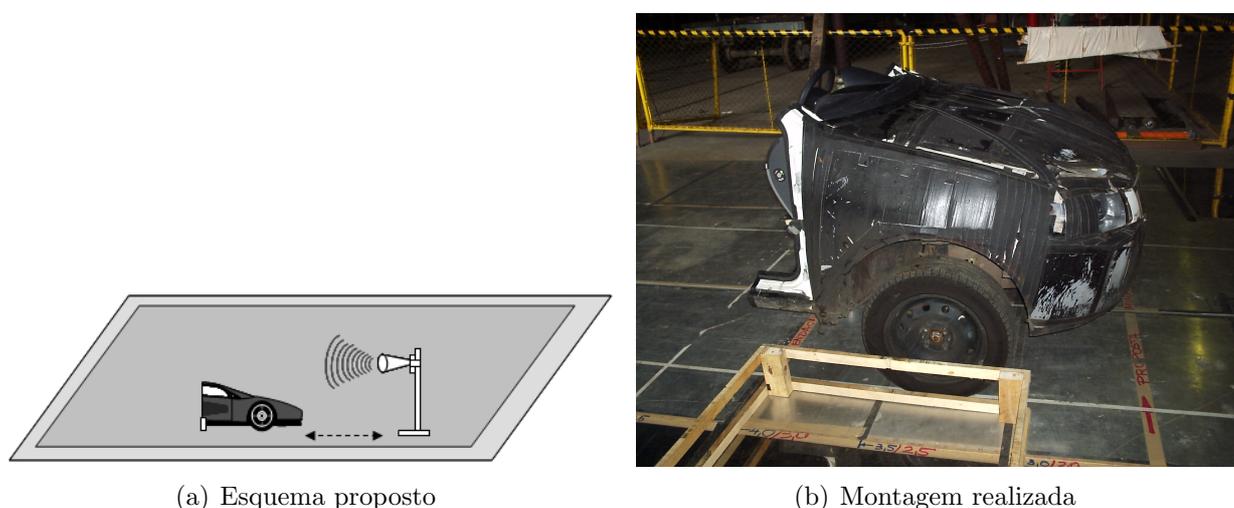


Figura 47: Experimento 2.4 - Medição de campo eletromagnético no interior do veículo cortado.

Os campos medidos no Quadro de Instrumentos e no Radio podem ser vistos na Fig. 48. Novamente é possível observar a semelhança no padrão das curvas apesar da variação da distância. Os valores encontrados para a função coerência são vistos na Tabela 14. Os erros encontrados são apresentados na Fig. 49.

Tabela 14: Máximo da função coerência para veículo cortado

Localização	Polarização H	Polarização V
Quadro Instrumentos	0,79	0,94
Radio	0,90	0,95

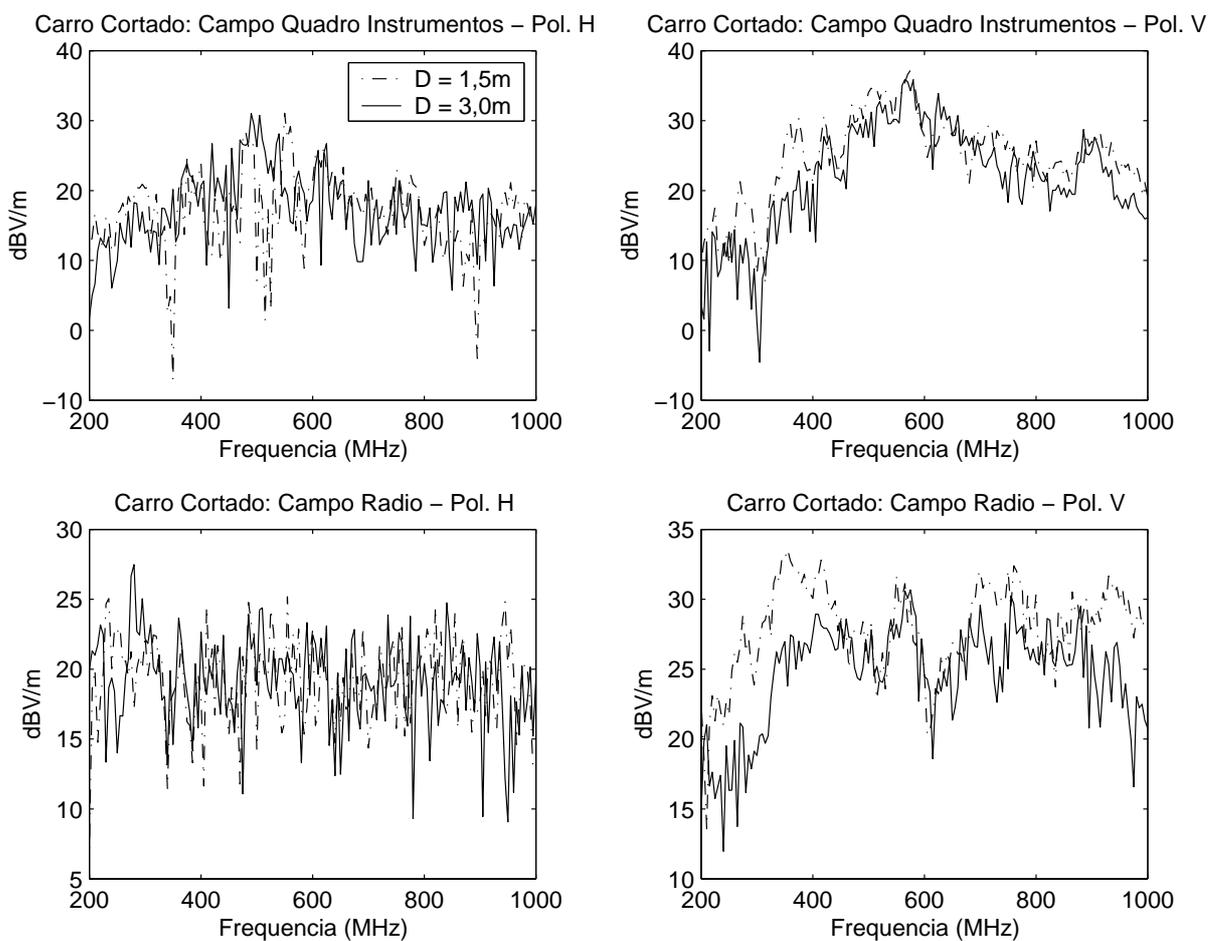


Figura 48: Campos medidos no interior do veículo cortado a diferentes distâncias.

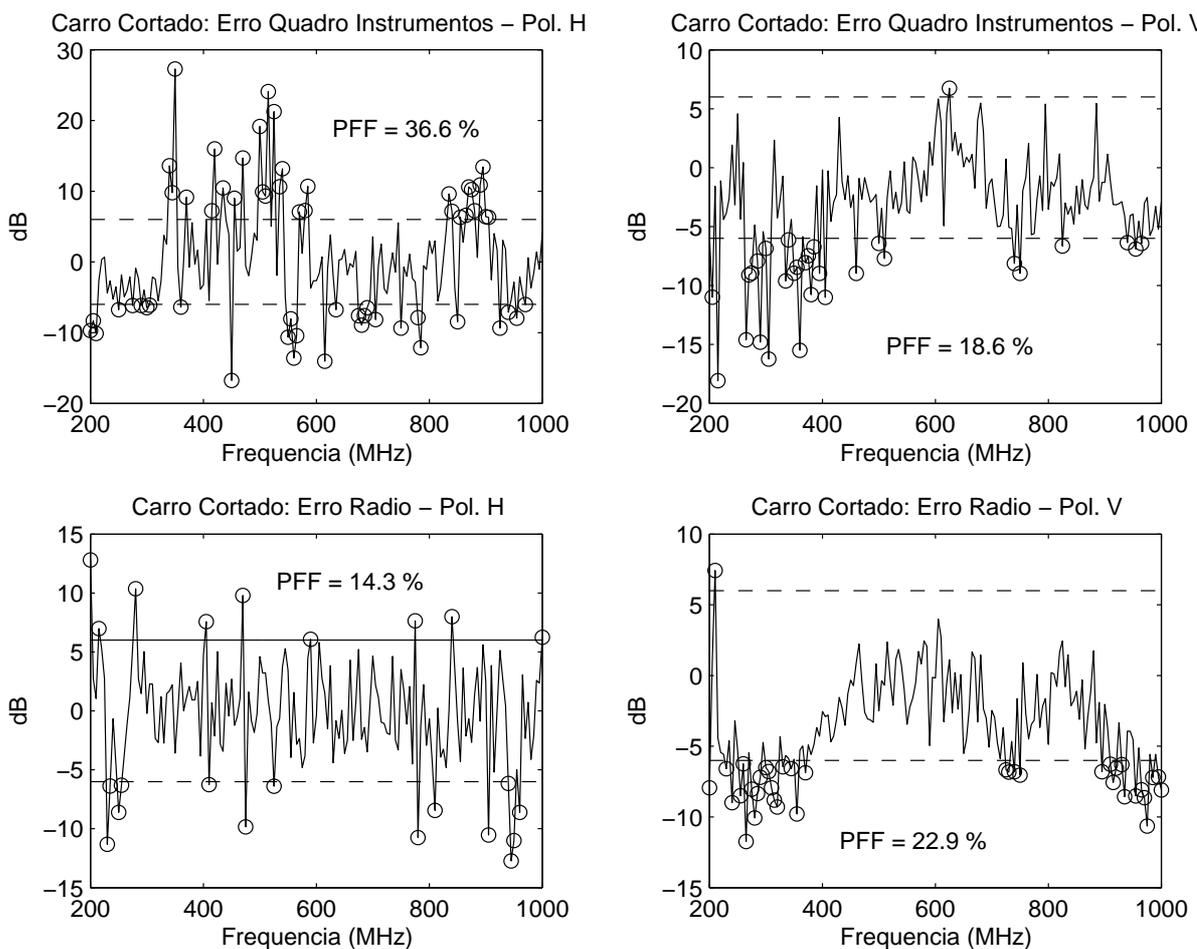


Figura 49: Erros calculados para veículo cortado em diferentes distâncias.

### 4.3.6 Verificação da influência do corte em veículo real

O objetivo desta seção é verificar a influência do corte nos campos medidos no interior do carro. Para tal, serão comparados os campos medidos no Quadro de Instrumentos e do Radio, para uma distância  $D = 3,0$  m entre antena emissora e veículo, que podem ser vistos na Fig. 50. Os valores encontrados para função coerência podem ser vistos na Tabela 15, e evidenciam o grau de similaridade entre os campos medidos. Na Fig. 51 são vistos os gráficos dos erros calculados, evidenciando o percentual de pontos encontrados fora da faixa de tolerância estabelecida.

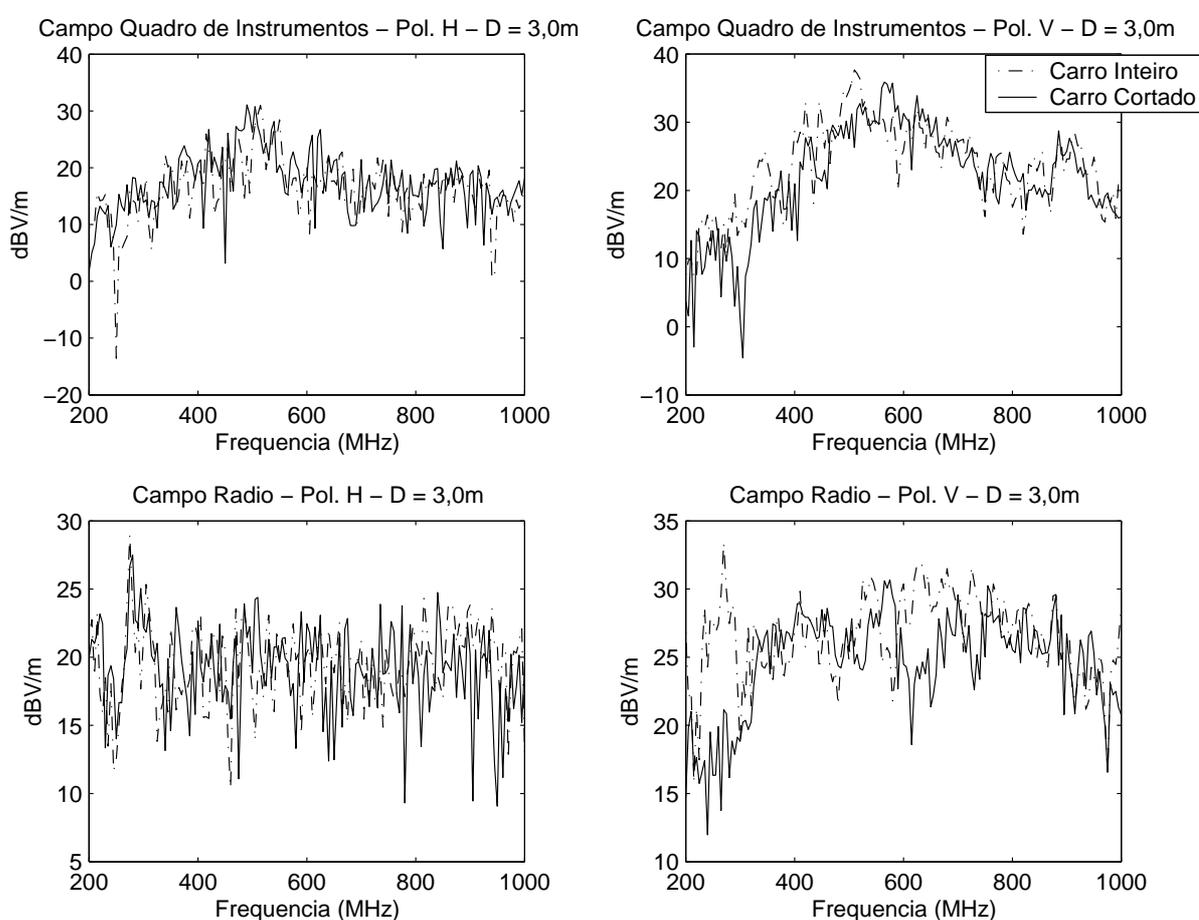


Figura 50: Comparação entre campos medidos para carro inteiro e cortado -  $D = 3,0$  m.

Tabela 15: Máximo da função coerência para veículo inteiro x cortado

Localização	Polarização H	Polarização V
Quadro Instrumentos	0,86	0,88
Radio	0,92	0,92

Uma observação interessante a ser feita é que normalmente, o ensaio é realizado apenas para o modelo tipo de determinada família de veículos, ou seja, ao se construir uma “pick-

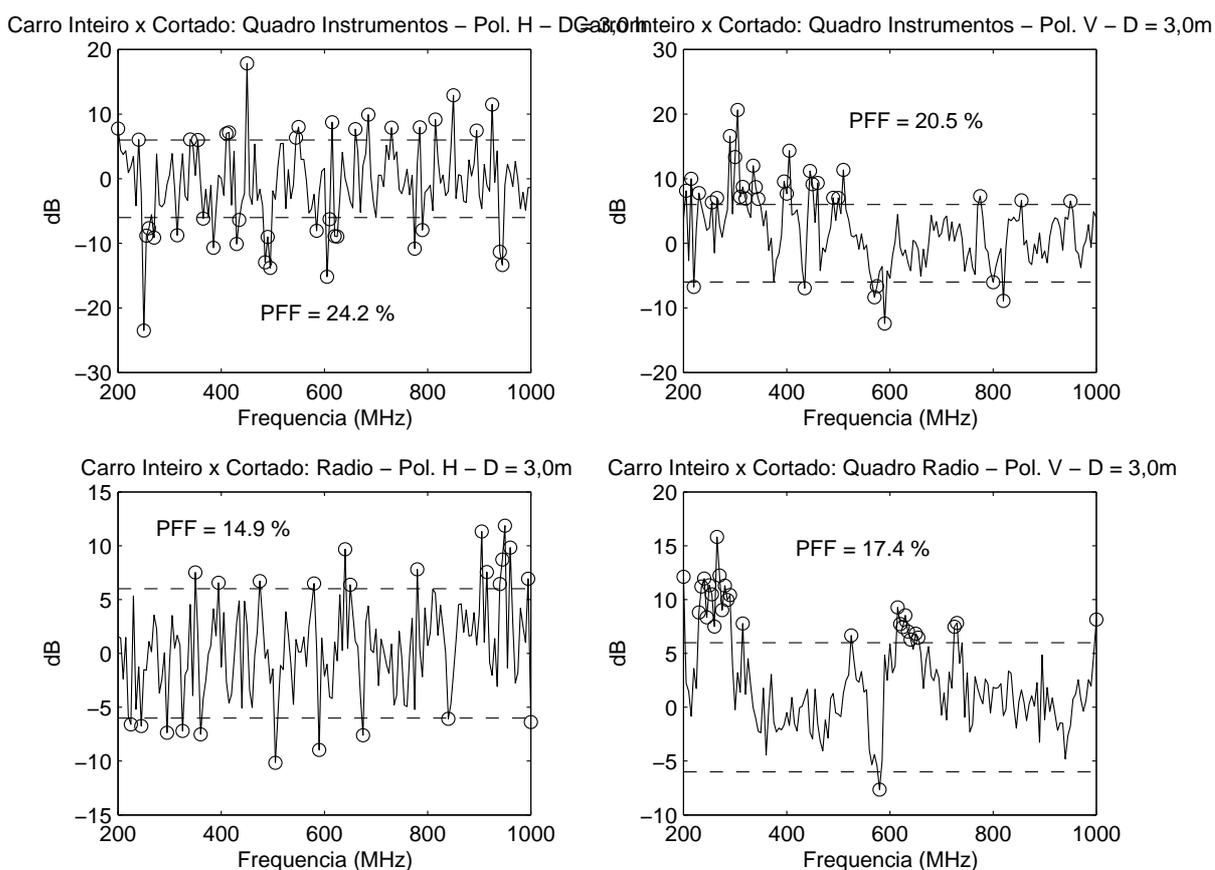


Figura 51: Erros entre campos medidos para carro inteiro e cortado -  $D = 3,0$  m.

up” de determinado modelo, os ensaios realizados no veículo tipo não são repetidos para esta versão. Vale lembrar que uma “pick-up” pode ser considerada uma forma de veículo cortado! Desta forma, surge o seguinte questionamento: quão similares são os campos medidos para estes dois modelos distintos? Para responder a este questionamento, o Experimento 2.4 foi reproduzido utilizando-se uma “pick-up” ao invés do carro cortado, conforme Fig. 52.

A comparação entre os campos medidos para o carro inteiro e a “pick-up” pode ser vista na Fig. 53. Percebe-se que não há grande variação para os resultados obtidos para a comparação entre o carro inteiro e o carro cortado. É interessante notar ainda, que os resultados obtidos para função coerência, no caso da “pick-up” são ligeiramente inferiores que os obtidos para o carro cortado, conforme Tabelas 15 e 16. A mesma constatação é observada nos gráficos de erros, conforme Fig. 54, para o campo medido no Quadro de Instrumentos.



Figura 52: “Pick-up” utilizada no experimento.

Tabela 16: Máximo da função coerência para veículo inteiro x “pick-up”

Localização	Polarização H	Polarização V
Quadro Instrumentos	0,76	0,88
Radio	0,93	0,92

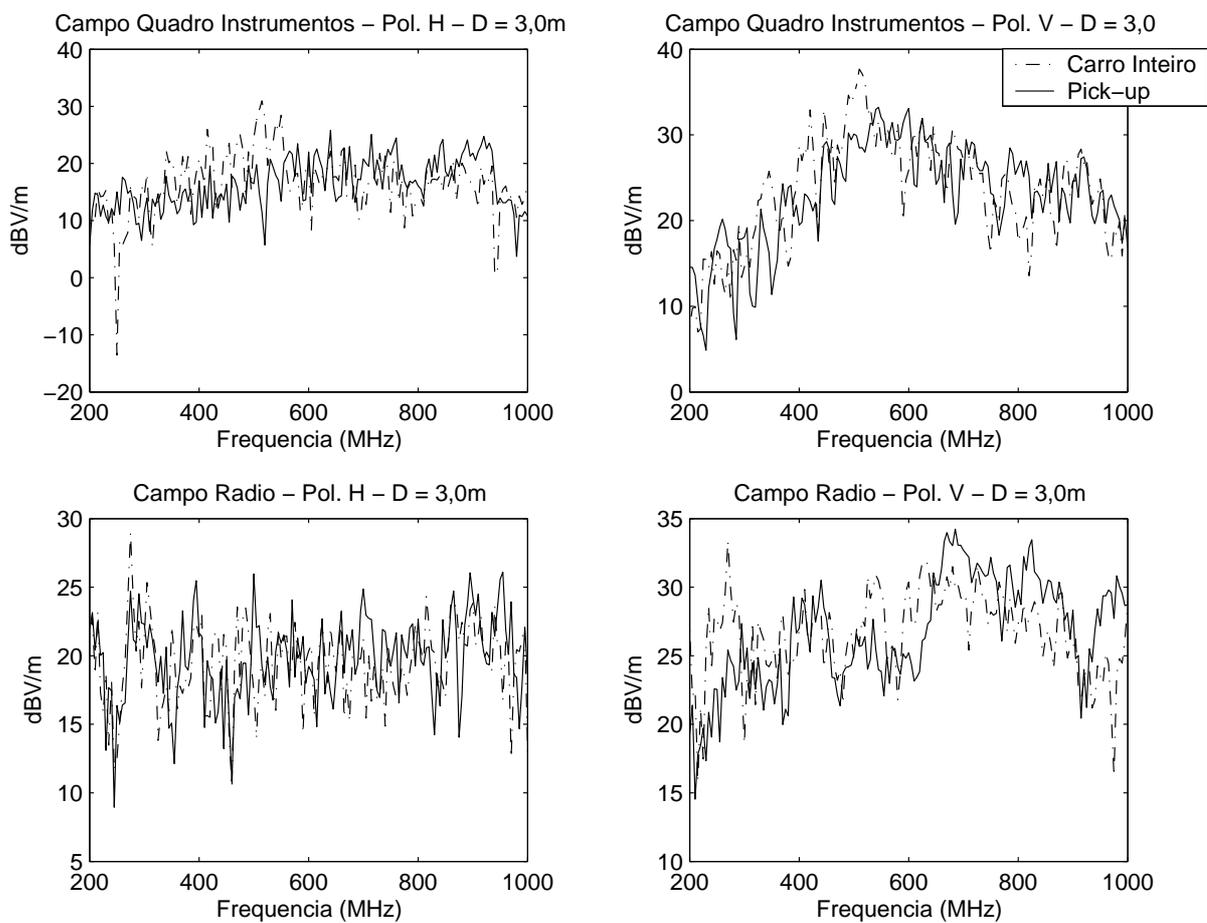


Figura 53: Comparação entre campos medidos para carro inteiro e “pick-up- D = 3,0 m.

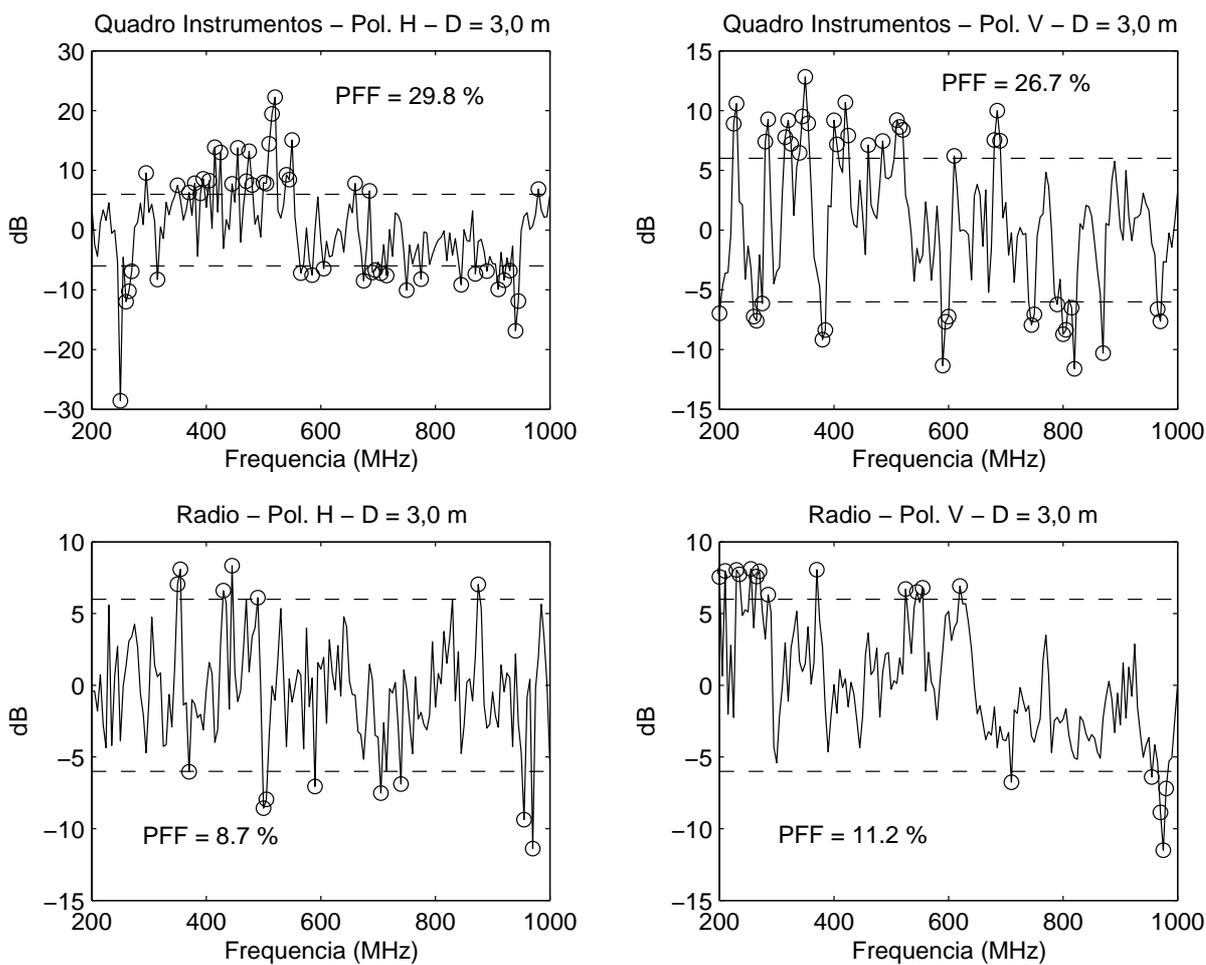


Figura 54: Erros entre campos medidos para carro inteiro e “pick-up- D = 3,0 m.

## 4.4 Realização de ensaios

O objetivo desta seção é avaliar a nova metodologia de ensaio proposta, com redução da distância entre antena e veículo e a utilização de um veículo cortado. Assim, os resultados obtidos para carro inteiro com distância  $D = 3,0$  m entre carro e antena serão comparados aos resultados obtidos para um carro cortado com distância  $D = 1,5$  m entre dispositivo sob teste e antena.

Inicialmente, serão comparados os resultados obtidos para medições realizadas em OATS, no LEAT. Posteriormente, serão comparados os resultados obtidos para ensaio realizado no LACE, segundo a nova proposição de ensaio, e os resultados obtidos em ensaio realizado em ELASIS, na Itália, para um veículo inteiro, e distância normalizada de 3,0 m.

### 4.4.1 Medições realizadas em OATS

Esta primeira avaliação utiliza os resultados dos experimentos realizados em OATS montado no LEAT. São comparados os campos medidos no interior do veículo, mais especificamente no Quadro de Instrumentos e no Rádio. Os campos medidos podem ser vistos na Fig. 55. Os valores da função coerência, exceto para medição realizada no quadro de instrumentos para polarização horizontal da antena emissora, são elevados, como pode ser visto na Tabela 17. Os erros encontrados podem ser vistos na Fig. 56 e percebe-se a relação inversamente proporcional entre o percentual de pontos fora da faixa de tolerância e os valores de coerência obtidos.

Tabela 17: Máximo da função coerência para carro inteiro ( $D=3,0$  m) e carro cortado ( $D=1,5$ m)

Localização	Polarização H	Polarização V
Quadro Instrumentos	0,75	0,90
Radio	0,90	0,90

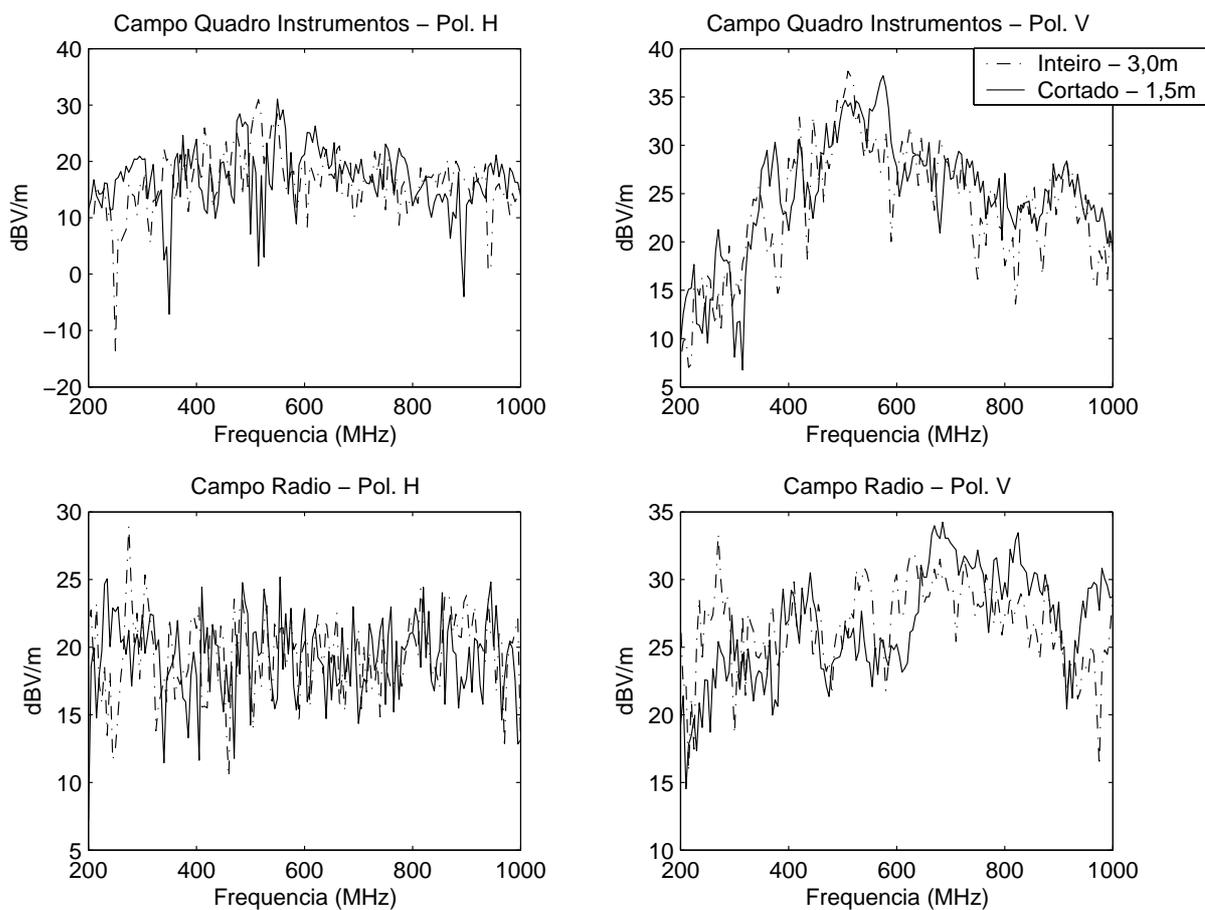


Figura 55: Comparação entre campos medidos para carro inteiro ( $D=3,0$  m) e carro cortado ( $D=1,5$  m).

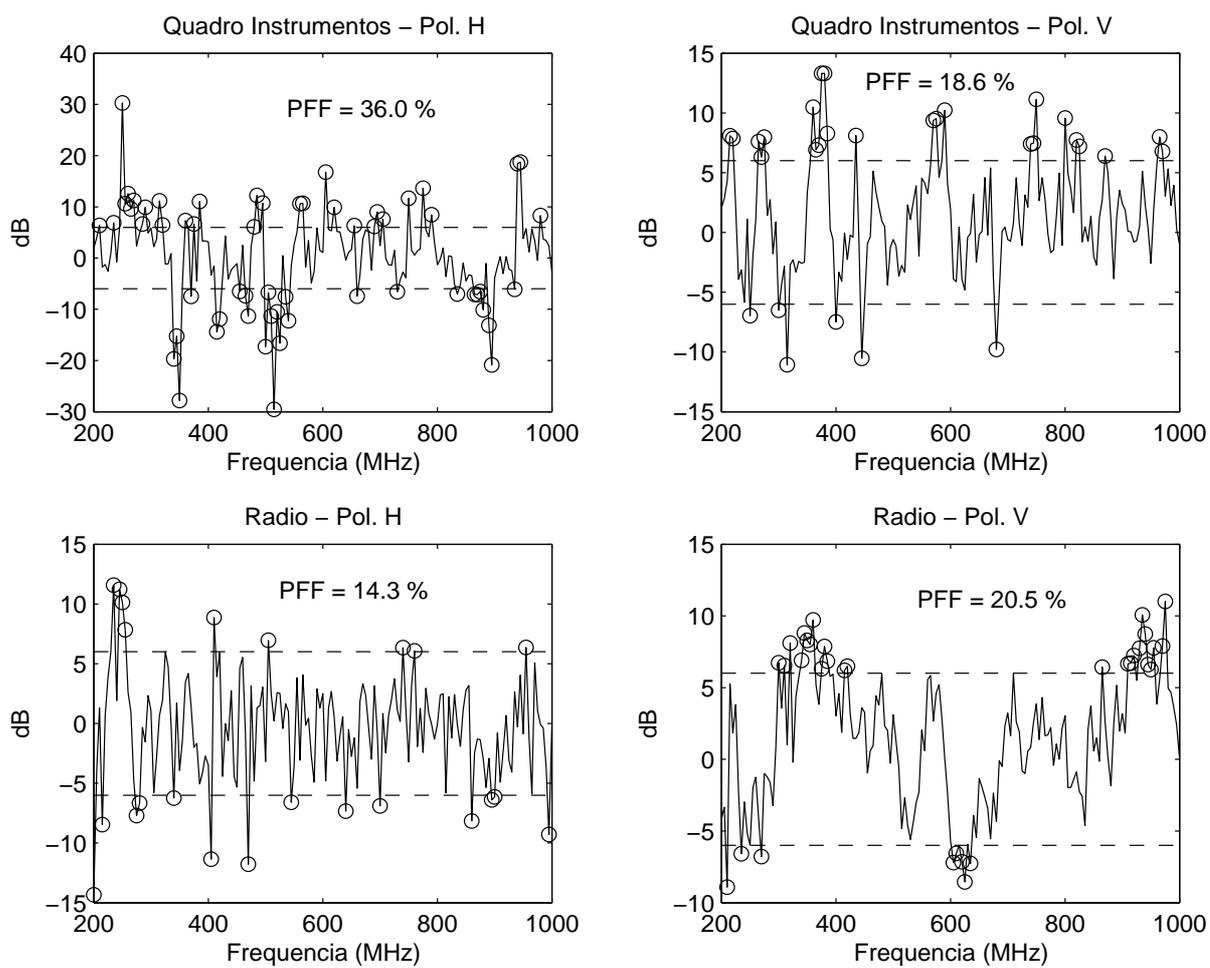


Figura 56: Erros entre campos medidos para carro inteiro ( $D=3,0$  m) e carro cortado ( $D=1,5$ m).

### 4.4.2 Medições realizadas em CSA

A proposta inicial deste experimento era a realização de um ensaio, de acordo com as normas internacionais adotadas, com a distância padronizada de 3,0 m entre veículo e antena emissora, em uma CSA de grande porte e comparar os resultados obtidos com um ensaio realizado, com as mesmas condições de campo eletromagnético gerado, em uma CSA de pequeno porte, utilizando um veículo cortado e a distância reduzida proposta. O ensaio em veículo completo, foi realizado no instituto ELASIS de pesquisa da FIAT, na Itália, conforme montagem apresentada na Fig. 57(b). O ensaio em veículo cortado, foi realizado no LACE da FIAT, em Betim, conforme montagem apresentada na Fig. 57(a).



(a) LACE, FIAT

(b) ELASIS, Itália

Figura 57: Montagens realizadas para realização de ensaios.

Porém, por limitações de tempo e de diferenças técnicas entre os equipamentos utilizados, não foi possível realização do ensaio nos dois ambiente com as mesmas condições. Desta forma as seguintes considerações devem ser feitas para análise dos resultados:

- No ensaio realizado em ELASIS foi utilizada uma antena log-periódica, ao invés da antena corneta utilizada nos demais experimentos realizados, com um ângulo de incidência  $\alpha = 15^\circ$  enquanto no LACE este ângulo foi nulo, já que a antena permaneceu paralela ao plano de referência;
- Devido às características do equipamento utilizado em ELASIS, não foi possível utilizar a metodologia de controle da potência líquida gerada pelo sistema, utilizada nos ensaios realizados no LACE.

Diante do exposto, não foi possível comparar diretamente os campos medidos nos dois ensaios. Para contornar este problema foi realizada a comparação entre as diferenças

encontradas entre o campo obtido na calibração, conforme a norma ISO 11451 (ISO, 2001b), e o campo medido durante os ensaios, conforme a Eq.4.1. Desta forma, compara-se apenas o distúrbio representado pelo veículo sob teste.

$$E(dB) = 20 \log \left( \frac{E_{Cal}}{E_{Med}} \right) \quad (4.1)$$

Foram realizadas medições em sete pontos no interior do veículo, na Fig.58 é apresentada a comparação entre os campos medidos em ELASIS e no LACE para o Quadro de Instrumentos e o Radio. Observa-se que a diferença entre os campos medidos é mais agravante para polarização horizontal e para as frequências mais baixas (até 500 MHz, aproximadamente). A diferença percebida reflete diretamente nos valores encontrados para a função coerência, que como podem ser vistos na Tabela 18, são bem menores que os valores encontrados nos experimentos realizados anteriormente. Considerando a faixa de tolerância previamente adotada de  $\pm 6dB$ , nota-se claramente, conforme a Fig. 59 que os campos medidos não atendem ao critério de uniformidade de campo, que estabelece que pelo menos 75 % dos pontos medidos devem estar dentro da faixa de tolerância.

Tabela 18: Máximo da função coerência para ensaios realizados em ELASIS e no LACE

<b>Localização</b>	<b>Polarização H</b>	<b>Polarização V</b>
Quadro Instrumentos	0,43	0,80
Radio	0,69	0,76

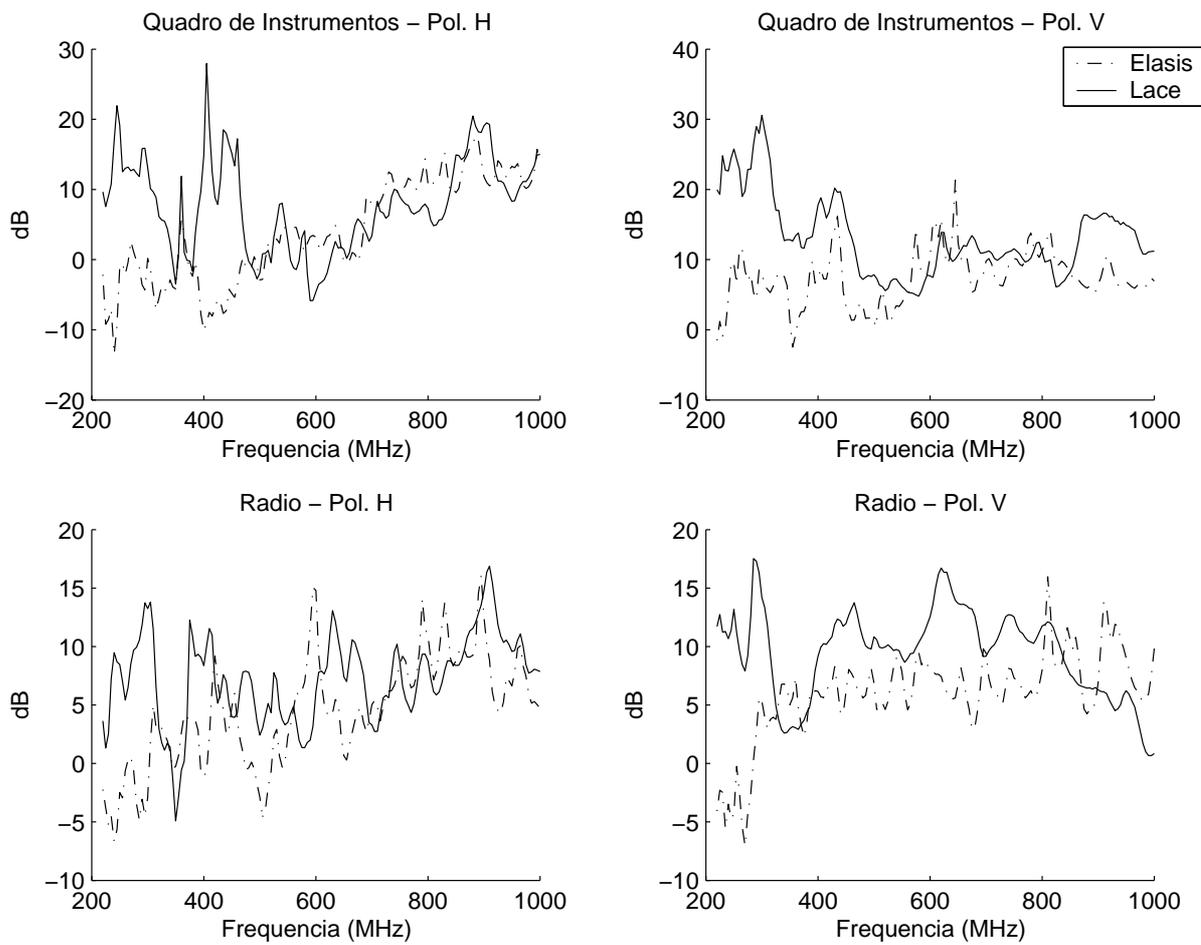


Figura 58: Comparação entre ensaios realizados em ELASIS e no LACE.

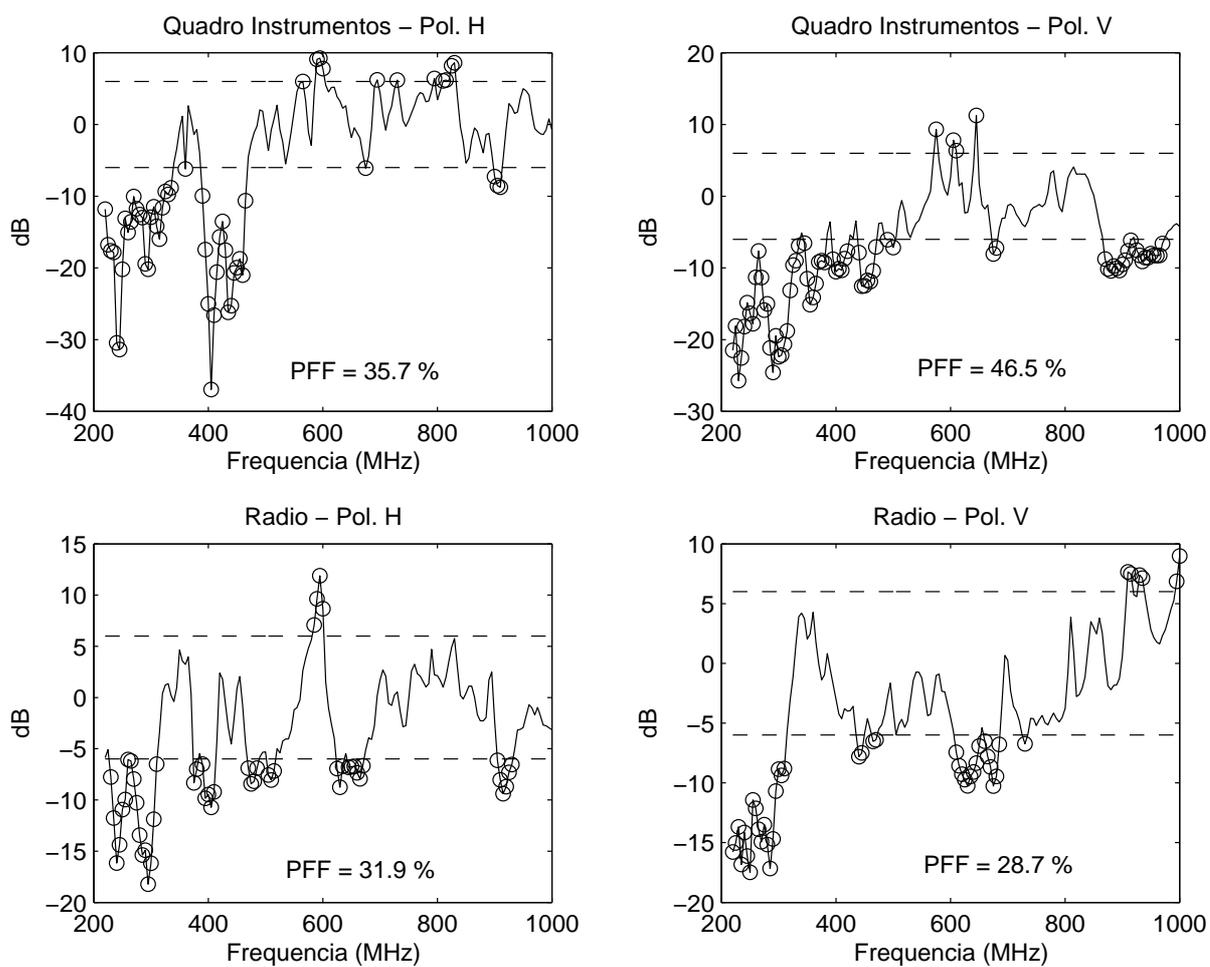


Figura 59: Erros entre ensaios realizados em ELASIS e no LACE.

## 4.5 Discussão dos Resultados

Neste capítulo foram apresentados uma série de resultados, encadeados de forma a tornar possível o conhecimento gradual de fatores importantes a serem considerados na proposta de ensaio apresentada, com o objetivo de fornecer elementos para uma avaliação crítica dos resultados encontrados.

Inicialmente, foram realizados uma série de experimentos com o objetivo de se conhecer melhor o comportamento do campo eletromagnético na faixa de frequência adotada nos ensaios, assim como as características da antena utilizada. Esta etapa foi fundamental para aquisição de maior familiaridade com as grandezas e equipamentos envolvidos e definição dos experimentos seguintes, possibilitando uma avaliação adequada do erro inserido ao se fazer determinadas considerações. A primeira constatação foi de que em todo o tempo trabalho-se na região de campo próximo, o que deve ser considerado ao se avaliar os fatores de decaimento do campo com a distância. Outra observação relevante, foi a influência das reflexões no plano de massa nos campos medidos no interior da CSA. O estudo de anteparos com aberturas e caixas ajudou a avaliar melhor os efeitos de blindagem e de ressonância no interior de cavidades. Todos estes elementos são fundamentais para avaliação de ensaios de suscetibilidade, pois indicam que parâmetros devem ser modificados de acordo com o resultado desejado.

O estudo realizado com os protótipos foi fundamental para melhor avaliação da influência da redução da distância entre antena e carro durante a realização do ensaio, e também da variação da forma do veículo sob teste. Devido às suas formas simplificadas foi possível verificar de forma objetiva a influência das variações propostas nos campos medidos. Os valores máximos obtidos para função coerência, variaram entre 0,84 e 0,96, indicando o forte grau de similaridade entre o campo elétrico medido nas diferentes situações. A função avaliada para o campo medido na região que representa o interior do veículo apresentou valores menores para o protótipo inteiro do que para o protótipo cortado, evidenciando a influência das reflexões nas paredes do protótipo. Tais resultados sugerem a possibilidade de realização da nova metodologia apresentada.

A etapa seguinte, constituiu na realização de experimentos com veículos em OATS, aumentando as variáveis que influenciam na variação do campo medido, dado o aumento da complexidade dos veículos, tanto na sua forma construtiva quanto na diversidade de materiais utilizados. Os resultados da função coerência variaram entre 0,79 e 0,95 sendo os valores mais baixos observados no quadro de instrumentos, para polarização

horizontal. Este resultado reflete a alteração estrutural do carro cortado, no qual as barras de sustentação do pára-brisas foram removidas. De maneira geral, os resultados obtidos para os veículos apresentaram valores de coerência mais elevados que os protótipos.

Uma discussão importante a ser feita, é a comparação entre os resultados obtidos para medições realizadas em veículo completo e “pick-up” de uma mesma versão, que são similares aos resultados obtidos para o carro cortado. Tal constatação reforça a possibilidade de utilização da nova metodologia proposta para pré-avaliação de um modelo.

Finalmente, são apresentados os resultados dos ensaios realizados em CSA’s de dimensões distintas, principal objeto de avaliação deste trabalho. Nestes ensaios são comparadas a metodologia proposta pela norma, com a nova metodologia proposta neste trabalho, fazendo com que todas as variações propostas sejam avaliadas simultaneamente. Como as condições dos ensaios não foram idênticas, não foi possível avaliar apenas os efeitos provocados apenas pela nova metodologia proposta. Os resultados da função coerência obtidos ao se comparar as montagens realizadas variam entre 0,43 e 0,8, bem abaixo da faixa de valores encontrados nos outros experimentos.

Na tentativa de se avaliar apenas os efeitos da redução de distância e do corte no veículo, simultaneamente, foram realizados ensaios em OATS, com as mesmas condições de campo emitido, para o carro inteiro a 3,0 m de distância da antena e o carro cortado a 1,5 m de distância da antena, e o valor obtido para a função coerência foi 0,9 em todos os casos analisados, exceto para o campo medido no quadro de instrumentos para polarização horizontal, que foi de 0,75. Acredita-se que se o corte realizado no veículo não descaracterizasse a parte dianteira do mesmo, este valor seria maior.

É importante ressaltar não foi utilizado nenhum tipo de filtragem nos valores de campo medidos, justamente porque em um ensaio de suscetibilidade eletromagnética as variações bruscas de campo, dependendo de sua intensidade, podem ser responsáveis pela desqualificação de um projeto.

## 5 *Conclusão e Propostas de Continuidade*

Os diversos experimentos propostos e analisados, ao longo deste trabalho, possibilitaram uma percepção mais clara dos diversos fenômenos existentes em um ensaio de suscetibilidade eletromagnética irradiada, envolvendo teoria de antenas, caracterização de campos eletromagnéticos na região de campo próximo, aplicação de conceitos de teoria de espalhamento eletromagnético, blindagem, aberturas e cavidades ressonantes.

Os resultados da função coerência obtidos, superiores a 0,88, indicam que a redução de distância entre antena e veículo é viável, constatação importante que permite a utilização de CSA's de dimensões reduzidas diminuindo o custo de realização deste tipo de ensaio.

A comparação entre carro inteiro e cortado para uma distância fixa, em OATS, apresentou resultados de coerência superiores a 0,86, indicando que a mudança na forma do veículo não apresenta distúrbio no campo medido no interior do mesmo tão acentuado quanto era de se esperar.

A comparação realizada entre os resultados obtidos para uma "pick-up" e um veículo completo, de uma mesma versão de modelo, sugerem a possibilidade de utilização de um carro cortado para avaliação de suscetibilidade eletromagnética do modelo, visto que o resultado da função coerência entre a "pick-up" e um veículo completo e veículo completo e carro cortado são muito similares. Os índices de coerência de 0,9 (exceto para polarização horizontal, que ficou em 0,75) apresentados para avaliação da nova metodologia em OATS também indicam viabilidade das modificações propostas, pelo menos para uma pré-avaliação dos veículos.

Os resultados apresentados nos ensaios realizados em ELASIS e no LACE possuem baixo valor de coerência, variando entre 0,43 e 0,8, evidenciando a introdução de outras variáveis no processo, como a diferença de antena utilizada e a diferença de metodologia adotada, que acrescentou erros que não são diretamente decorrentes das modificações propostas pela nova metodologia de ensaio.

As principais propostas de continuidade deste trabalho podem ser sumarizadas da seguinte maneira:

- Avaliação do acoplamento da antena e do veículo sob teste através da medição de sua impedância utilizando um Analisador de Rede;
- Utilização dos resultados obtidos nos experimentos realizados com os protótipos para validação de resultados de simulações numéricas;
- Realização de novos ensaios em CSA's, sem variação dos parâmetros de controle utilizados, para melhor avaliação das modificações propostas, o que pode conduzir a modificações na forma do veículo cortado utilizado;
- Verificação da influência das modificações propostas pela nova metodologia nas correntes induzidas nos cabos elétricos do veículo.

## *Referências*

ADRIANO, R. L. da S. *Modelagem Computacional Aplicada à Solução de Problemas de Interação Eletromagnética*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.

ALFARO, J. A. G. *PROJETO DE ANTENA OTIMIZADA PARA A REALIZAÇÃO DE TESTES DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNETICA EM AUTOMOVEIS*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2006.

ALVARENGA, L. *Proposta de pesquisa em compatibilidade eletromagnética Mini-Setup EMI FIAT*. Betim, MG, 2003.

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE ANSI. *Methods of Measurements of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9kHz to 40GHz*. July 1992.

ANDERSEN, P.; WILLIAMS, K. A review of today's automotive emc standards. *Evaluation Engineering*, 2003, accessed in Set. 2008. Disponível em: <<http://www.evaluationengineering.com/archive/articles/1203emc.htm>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. accessed Set.2008. Disponível em: <<http://www.abnt.org.br>>.

BALANIS, C. A. *Antenna Theory - Analysis and Design*. New York, NY: J. W. Sons, 1982.

BERRY, J. B.; HICKS, S. G. A study of radiated electromagnetic susceptibility test requirements and procedures. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Chicago, USA, p. 48-53, Aug 1994.

DEPARTMENT OF DEFENSE - UNITED STATES OF AMERICA. *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment (MIL-STD-461E)*. 1999.

FICHEUX, S.; KLINGLER, M.; M.HEDDEBAUT. Testing of automotive electronic components regarding influence of electromagnetic field strength levels radiated by lightning discharges-application to a multiplexing communication system. *Automotive Electronics,1991.,Eighth International Conference on*, 1991.

G.A.JACKSON. Setting the standards - the european emc directive. *IEE Review*, April 1990.

G.A.JACKSON. Emc directives and standards. *Engineering Science and Education Journal*, October 1993.

- GOEDBLOED, J. J. Uncertainties in emc compliance testing. *IEE*, 1997.
- HOLLOWAY, C. L. et al. Comparison of electromagnetic absorber used in anechoic and semi-anechoic chambers for emissions and immunity testing of digital devices. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 39, n. 1, p. 33–47, 1997.
- HOLLOWAY, C. L.; KUESTER, E. F. Modeling semi-anechoic electromagnetic measurement chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 38, n. 1, p. 79–84, 1996.
- HOLLOWAY, C. L. et al. Time-domain modeling, characterization, and measurements of anechoic and semi-anechoic electromagnetic chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 44, n. 1, p. 102–118, 2002.
- IEC. *IEC 61000-4-3 Test and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*. 2006.
- IEE. *IEE Guidance Document on EMC & Functional Safety*. 2000, accessed in 2004. Disponível em: <[www.iee.org.uk/PAB/EMC/core.htm](http://www.iee.org.uk/PAB/EMC/core.htm)>.
- I.E.NOBLE. Electromagnetic compatibility in the automotive environment. *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, v. 141, n. 4, 1994.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. accessed Set.2008. Disponível em: <<http://www.iec.ch>>.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Electromagnetic compatibility for industrial - process measurement and control equipment(IEC 801.x)*. 1984.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. accessed Set.2008. Disponível em: <<http://www.iso.org>>.
- ISO. *ISO11451-1 Road vehicles – Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Part 1: General and definitions*. 2001.
- ISO. *ISO11451-2 Road vehicles – Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy – Part 2: Off-vehicle radiation sources*. 2001.
- KRAUS, J. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1978.
- KRAUS, J. D. *Antenas*. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1983.
- PALETTA JEAN-PHILIPPE PARMANTIER, F. I. P. D. L.; ALLIOT, J.-C. Susceptibility analysis of wiring in a complex system combining a 3-d solver and a transmission-line network simulation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 44, n. 2, 2002.
- PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1992.

PIRES, R. S. da S. *Investigação de uma Nova Metodologia para Ensaios de Suscetibilidade Eletromagnética em Veículos Automotivos*. Tese (Exame de Qualificação) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2005.

SANTOS, G. *Considerações do ambiente eletromagnético urbano na análise de interferência em veículos automotores*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2002.

SANTOS, L. A. L. *Análise Experimental do Ensaio Veicular de Imunidade a Campos Eletromagnéticos Radiados em Câmara Semi-aneecóica de Pequeno Porte*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007.

SMITH, J. O. *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT), with audio applications, 2007, second edition, online book*. accessed Set.2008. Disponível em: <<http://ccrma.stanford.edu/jos/mdft/>>.

TEUNE, J. E.; MEE, S. W. A comparison of rf field uniformity in a compact semi-anechoic room and oaks. 2001.

VIEIRA, J. et al. Detecção de fontes sonoras e obstáculos usando técnicas de correlação. *Encontro Científico do Fest. Nac. de Robótica*, Guimarães, Portugal, 2001.

# *APÊNDICE A – Descrição de Equipamentos do LACE FIAT*

A seguir, vê-se a relação dos principais equipamentos utilizados nas medições realizadas no presente trabalho:

- Conjunto de medição para ensaios de suscetibilidade irradiada, composto pelos equipamentos listados na Tabela (19);

Tabela 19: Descrição dos equipamentos que constituem o conjunto de medição.

<b>Equipamento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Fabricante</b>
EMI Test Receiver 9kHz - 30MHz	ESHS 10	Rohde & Schwarz
EMI Test Receiver 20 - 1000MHz	ESVS 10	Rohde & Schwarz
Function Generator 10mHz - 20MHz	AFG	Rohde & Schwarz
Signal Generator 9kHz - 1,040GHz	SMY01	Rohde & Schwarz
Milivoltmeter	URV 5	Rohde & Schwarz
Dual Directional Coupler	DC6180	Amplifier Research
RF System Panel	TS-RSP	Rohde & Schwarz
Field Monitor	FM 5004	Amplifier Research
Line Distributor with EMI Filter	CS-LDE	Rohde & Schwarz

- Amplificadores:

Model 500W 1000A	80 a 100MHz	Fabricante: Amplifier Research
Model 75A250-75Watts	10kHz a 250MHz	Fabricante: Amplifier Research

- Antena: Model 3106 - Double Ridged Waveguide Horn - Fabricante: ETS-Lindgren  
Faixa de Frequência: 200MHz - 2GHz
- Sensor de Campo Elétrico Isotrópico (Field Probe): FP5000 - Fabricante: Amplifier Research  
Faixa de Frequência: 10kHz - 1GHz
- Cabos e fibras-ópticas para interligação dos elementos do sistema.

## *APÊNDICE B – Dados Técnicos da Antena Corneta Model 3106*

São apresentados a seguir o fator de antena, Fig. 60, o ganho, Fig. 61 e a taxa de onda estacionária (VSWR), Fig. 62 para a antena modelo 3106, fabricada pela ETS-Lindgren, utilizada nos experimentos realizados. Maiores informações podem ser encontradas no *web site* do fabricante (<http://www.ets-lindgren.com>).

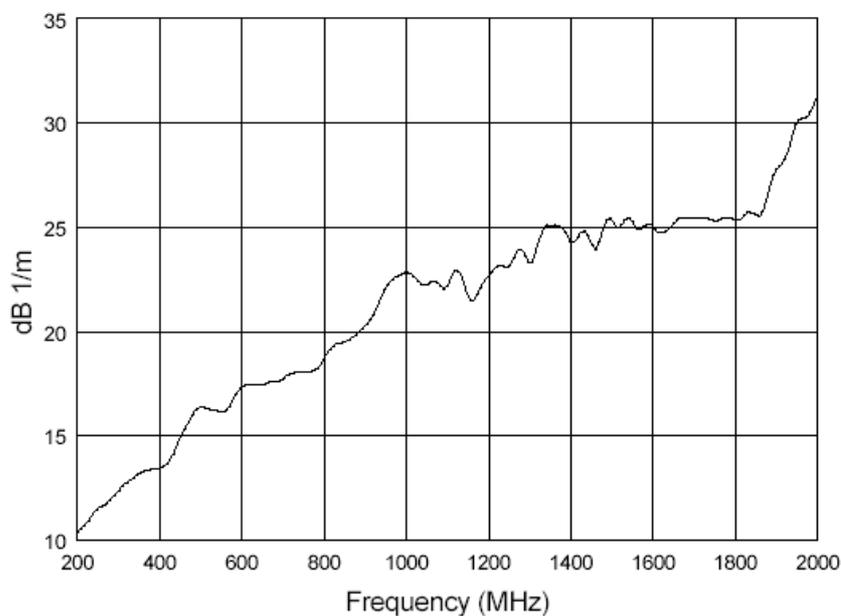


Figura 60: Fator de antena, para Modelo 3106.

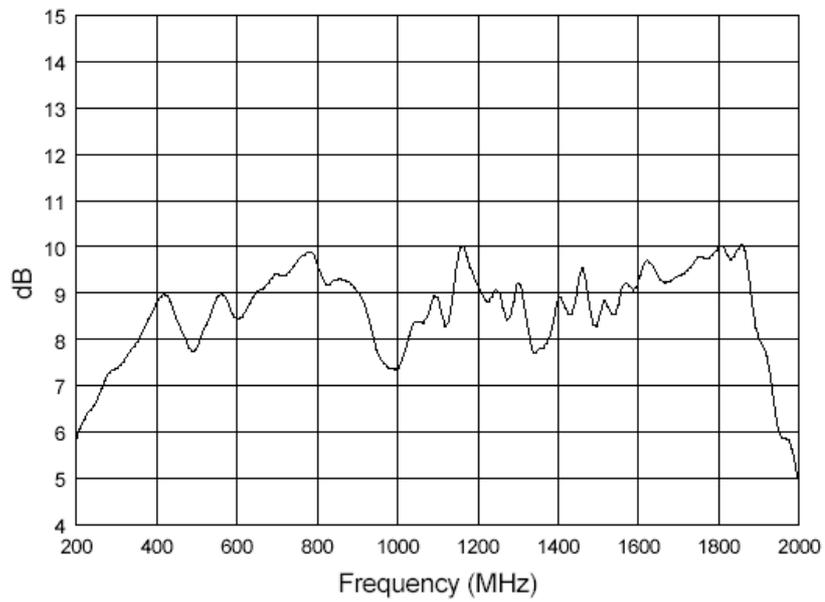


Figura 61: Ganho, para Modelo 3106.

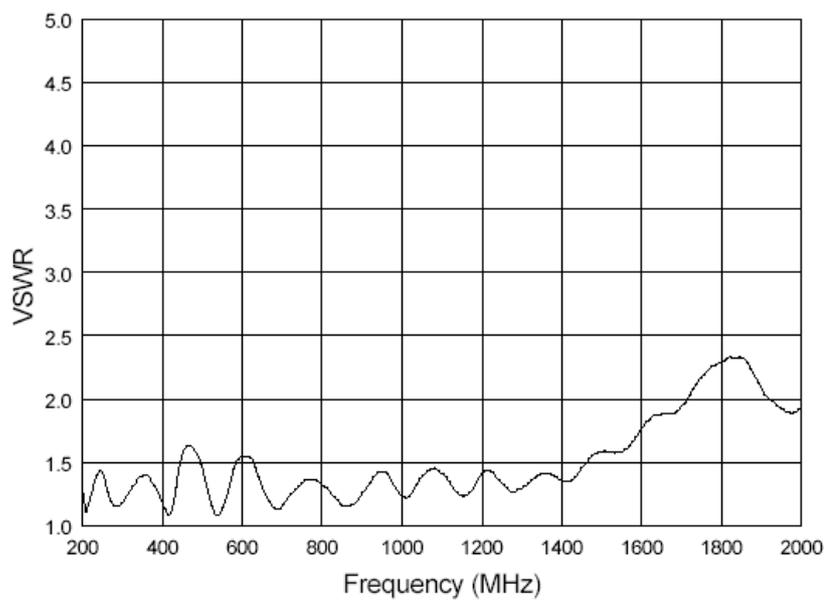


Figura 62: TOE (VSWR): Taxa de Onda Estacionária, para Modelo 3106