

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO DE ANTENA OTIMIZADA PARA A
REALIZAÇÃO DE TESTES DE COMPATIBILIDADE
ELETROMAGNÉTICA EM AUTOMÓVEIS**

JAVIER ANDRES GARCIA ALFARO

ORIENTADOR: LEONARDO R. A. X. DE MENEZES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: 226/2006

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2006

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PROJETO DE ANTENA OTIMIZADA PARA A REALIZAÇÃO DE
TESTES DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM
AUTOMÓVEIS**

JAVIER ANDRES GARCIA ALFARO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

APROVADA POR:

Prof. Leonardo Rodrigues Araújo Xavier de Menezes, PhD, UnB
(Orientador)

Prof. Antonio José Martins Soares, PhD, UnB
(Examinador Interno)

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
(Examinadora Externa)

BRASÍLIA/DF, 30 DE AGOSTO DE 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

ALFARO, JAVIER ANDRES GARCIA

Projeto de antena otimizada para a realização de testes de compatibilidade eletromagnética em automóveis [Distrito Federal] 2006.

xii, 87p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. CEM

2. Câmara Anecóica

3. Análise e síntese de Antenas

4. Algoritmos Genéticos

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALFARO, J. G. (2006). Projeto de antena otimizada para a realização de testes de compatibilidade eletromagnética em automóveis. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação 266/2006, Departamento de Engenharia Elétrica - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Javier Andrés García Alfaro.

TÍTULO: Projeto de antena otimizada para a realização de testes de compatibilidade eletromagnética em automóveis.

GRAU: Mestre

ANO: 2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Javier Andrés García Alfaro
QI33 Lote 5 Bloco C Ap 211
Guará II – Brasília D.F.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus a quem devo minha vida e deu-me as virtudes necessárias para a realização e conclusão deste trabalho.

Ao Professor Dr. Leonardo RAX de Menezes, pelo incalculável apoio, cooperação, ajuda, e sobre todo pela paciência durante todo o transcurso do mestrado. Agradeço principalmente o interesse e a confiança depositada em cada uma das etapas do projeto.

Ao grupo de engenharia da FIAT SA - Betim (MG), à UnB e ao CNPq, pela disposição e oportunidade oferecida, que possibilitou a execução deste projeto.

A cada um dos professores e colegas do projeto FIAT em Belo Horizonte, em especial ao Professor Dr. José Oswaldo Saldanha e as alunas Roginele Salatiel e Raquel Freitas por ter me acolhido e colaborado durante a realização dos testes.

Ao meu colega e amigo Juan Carlos Mateus, que sempre está me incentivando e aconselhando há mais de 10 anos. Sempre com a disposição e sinceridade que lhe caracteriza.

Ao meu grande amor, Regina Santos, pelo carinho, paciência e compreensão durante estes anos de estudo e convivência no Brasil. Sem ela, a tristeza e as saudades de casa teriam afogado meu entendimento e razão de viver.

A minha família pelo incentivo e apoio que sempre me deram.

E finalmente cada um dos meus amigos e colegas brasileiros e colombianos que fizeram com que o choque de culturas fosse menos tortuoso neste “Brasil Brasileiro”.

RESUMO

PROJETO DE ANTENA OTIMIZADA PARA A REALIZAÇÃO DE TESTES DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM AUTOMOVEIS

Autor: Javier Andrés García Alfaro

Orientador: Dr. Leonardo R.A.X de Menezes

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, Agosto de 2006.

Frente aos vários avanços tecnológicos envolvidos na construção de automóveis e os diferentes fenômenos eletromagnéticos existentes, a análise de Compatibilidade Eletromagnética em equipamentos eletrônicos torna-se importante.

Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto e otimização de antenas para realização de testes de compatibilidade eletromagnética em automóveis. Para tanto, é necessário considerar a distribuição do campo elétrico gerado pelas antenas dentro de uma Câmara Semi-Anecóica de pequeno porte. Esta situação é normal para as condições de teste em automóveis segundo normas internacionais.

Ao longo deste trabalho são discutidos detalhes da implementação da antena otimizada. Complementarmente, são apresentados resultados práticos correspondentes às medidas realizadas na Câmara Semi-Anecóica dos laboratórios da FIAT. Destacam-se a comparação das medições efetuadas com a antena projetada, baseando-se no método de otimização dos Algoritmos Genéticos e antenas convencionais.

Os dados adquiridos no laboratório são correlacionados com resultados obtidos em ferramentas de simulação eletromagnética. São discutidos diversos aspectos de desempenho, verificando os níveis de radiação disponíveis com cada antena, frente às exigências das normas internacionais. A correlação entre as medições e simulações realizadas, apresentou resultados bastante satisfatórios.

ABSTRACT

OPTIMIZATION DESIGN OF ANTENNA USED IN A AUTOMOTIVE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTS

Author: Javier Andrés García Alfaro

Supervisor: Dr. Leonardo R.A.X de Menezes

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, Agosto de 2006.

Considering the technological advances about vehicle construction and the different electromagnetic phenomena, the analysis of Electromagnetic Compatibility in electronic equipment becomes important.

This work presents a methodology of design and optimization for antennas to be used in tests of automobile electromagnetic compatibility. Thus, it's necessary to consider the distribution of the generated electric field by the antennas inside of a small size Semi-Anechoic Chamber. This is an ordinary situation for conditions of test in vehicles according to international standards.

In this work, details about the implementation of the optimized antenna are discussed. As a complement, practical results corresponding to the measures made in the FIAT's Semi-Anechoic Chamber laboratories are presented. Is standing out the comparison of the measurements carried out with the projected antenna, based on the Genetic Algorithms optimization method for conventional antennas.

The laboratory obtained data are correlated with results gotten in electromagnetic code. Different aspects about code performance are discussed, verifying the available levels of radiation with each antenna regarding the requirements of the international standard. The correlation between the measurements and simulations presented satisfactory results.

ÍNDICE

CAPÍTULO	P ÁGINA
Lista de Tabelas	ix
Lista de Figuras.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM AUTOMÓVEIS.....	6
2.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA	6
2.2 SENSIBILIDADE E IMUNIDADE ELETROMAGNÉTICA.....	6
2.3 AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DO VEÍCULO	7
2.3.1 Ambiente Interno	7
2.3.2 Ambiente Externo	8
2.4 CÂMARA ANECOICA	9
2.4.1 Tipos de câmara anecóica	9
2.4.2 Elementos absorvedores.	11
2.5 CSA DO LACE	12
3. NORMAS	14
3.1 Normas internacionais na área automotiva.....	14
3.2 Disposição dos testes	18
3.3 Normas nacionais.....	22
4. PROJETO DE ANTENA.....	24
4.1 Escolha da geometria da antena.....	25
4.2 Antena Log periódica de fio	27
4.3 Ferramentas de simulação.....	32
5. OTMIZAÇÃO DE ANTENA COM ALGORITMOS GENETICOS	41
5.1 ALGORITMOS GENÉTICOS	41
5.2 Parâmetros de análise em AG.....	42
5.2.1 Condições iniciais	42
5.2.2 Tamanho da população e gerações	42
5.2.3 Estratégias de Seleção.....	43
5.3 Operadores genéticos.....	43
5.3.1 BLX (Blend Crossover).....	44
5.3.2 Binário	44

5.4	Operador de Mutação.....	45
5.5	Procedimento de otimização.....	46
5.6	Resultado da otimização.....	49
5.7	Análise da distribuição do campo elétrico.....	58
6.	MEDIÇÕES E RESULTADOS.....	66
6.1	PROCEDIMENTO DO TESTE.....	66
6.1.1	Equipamentos do laboratório.....	66
6.2	ANTENA TIPO CORNETA.....	68
6.3	ANTENA LPDA FIAT.....	73
6.4	CONSTRUÇÃO DA ANTENA OP2.....	74
6.5	MEDIDA DO SWR.....	75
6.6	MEDIDA DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO.....	77
6.7	MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO.....	79
7.	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

Lista de Tabelas

Tabela 2.1-Eficiência de blindagem da CSA do LACE.	13
Tabela 3.1-Principais normas para o estudo de CEM e IEM em automóveis	15
Tabela 3.2-Referência equivalente entre normas ISO e SAE para CEM em automóveis ...	17
Tabela 3.3-Estrutura da Norma ISO 11451.	17
Tabela 3.4-Estrutura da Norma ISO 11452.	18
Tabela 3.5-Níveis de intensidade de campo elétrico segundo ISO 11451-2:2001	19
Tabela 3.6-Limites para a exposição de campos eletromagnéticos estabelecidos pelas normas aplicáveis a frequências entre 200 e 1000MHz	22
Tabela 4.1-Valores de diferentes antenas em função do ganho.....	31
Tabela 4.2-Elementos da antena LPDA Básica ($\tau=0.84$ e $\sigma = 0.14$).	32
Tabela 4.3-Valores Principais da linha de transmissão da LPDA básica.	32
Tabela 5.1-Resumo de operadores de seleção e cruzamento empregados na simulação.....	46
Tabela 5.2-Características dos melhores indivíduos na otimização Ot1 e Ot2	52
Tabela 5.3-Resumo de resultados de Ot1 e Ot2.....	52
Tabela 6.1-Características técnicas do FP-5000	68
Tabela 6.2-Intensidade de Campo Elétrico antena Tipo corneta posição 4,5 e 6	72
Tabela 6.3-Intensidade de Campo Elétrico antena Tipo corneta posição 7,8 e 9	73
Tabela 6.4-Intensidade de campo elétrico posições 4, 5 e 6 da LPDA FIAT.....	74
Tabela 6.5-Intensidade de campo elétrico posições 4, 5 e 6 da LPDA FIAT.....	74
Tabela 6.6-Detalhes físicos dos elementos da antena Op2	75
Tabela 6.7-Detalhes físicos da construção da antena Op2.....	75
Tabela 6.8-Intensidade de campo elétrico posições 4, 5 e 6 da Op2	80
Tabela 6.9-Intensidade de campo elétrico posições 7, 8 e 9 da Op2	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1-Distribuição aproximada de elementos elétricos e eletrônicos no automovel.	3
Figura 1.2-Protótipo de automóvel FIAT PALIO cortado pela metade	4
Figura 2.1 Ambiente eletromagnético interno do automóvel.	7
Figura 2.2 Ambiente eletromagnético externo do veículo.....	8
Figura 2.3 Formas típicas de câmara anecóica. a) Câmara retangular, b) Câmara cônica. .	10
Figura 2.4-Câmara Anecóica de grande porte. Avaliação de CEM em aeronaves.....	10
Figura 2.5-Câmara Semi Anecóica do LACE - FIAT	12
Figura 2.6-Equipamentos de controle e teste do LACE.	13
Figura 3.1-Esquema da montagem para a análise de IEM e CEM em automóveis	19
Figura 3.2-Disposição geométrica do elemento radiador e veículo em teste	21
Figura 4.1-Método TLS.	24
Figura 4.2-Geometria típica de uma LPDA.....	27
Figura 4.3-Disposição dos elementos físicos da LPDA em configuração coaxial.	30
Figura 4.4-Diagrama de radiação para LPDA Básica em 200MHz.....	35
Figura 4.5-Diagrama de radiação para LPDA Básica em 400MHz.....	35
Figura 4.6-Diagrama de radiação para LPDA Básica em 600MHz.....	36
Figura 4.7-Diagrama de radiação para LPDA Básica em 800MHz.....	36
Figura 4.8-Curva do Ganho em função da frequência para antena LPDA Básica	37
Figura 4.9-Curva do SWR em função da frequência para antena LPDA Básica	37
Figura 4.10 Diagramas de radiação LPDA Básica simulada com HFSS em 200 MHz.	38
Figura 4.11-Diagramas de radiação LPDA Básica simulada com HFSS em 600 MHz.....	38
Figura 4.12-Resultado do VSWR em função da frequência simulado em HFSS.....	39
Figura 5.1-Cruzamento Binário de ponto único	45
Figura 5.2-Cruzamento Binário de ponto duplo	45
Figura 5.3-Processo de otimização da antena LPDA com AG.....	47
Figura 5.4-Processo de análise com Algoritmos Genéticos	48
Figura 5.5-Resposta do Ganho em frequência dos melhores indivíduos Ot1.....	50
Figura 5.6-Resposta do Ganho em frequência dos melhores indivíduos Ot2.....	50
Figura 5.7 Resposta do SWR em frequência dos melhores indivíduos de Ot1	51
Figura 5.8-Resposta do SWR em frequência dos melhores indivíduos de Ot2.....	51
Figura 5.9-Ganho em Frequência das antenas Básica, Op1 e Op2.....	53
Figura 5.10-SWR em Frequência das antenas Básica, Op1 e Op2.....	53

Figura 5.11-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 200MHz	54
Figura 5.12-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 400MHz.....	54
Figura 5.13-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 600MHz	55
Figura 5.14-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 800MHz	55
Figura 5.15 Diagrama de radiação obtido com HFSS da antena Op2 em 200 MHz	56
Figura 5.16-Diagrama de radiação obtido com HFSS da antena Op2 em 600MHz.....	56
Figura 5.17-Resposta simulada no HFSS do SWR na frequência da antena Op2.....	57
Figura 5.18-Resposta simulada no HFSS do ganho na Frequência da antena Op2.....	57
Figura 5.19-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Básica em 200MHz.....	59
Figura 5.20-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Básica em 600GHz.	60
Figura 5.21-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Op2 em 200GHz.	61
Figura 5.22-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Op2 em 600GHz.	62
Figura 5.23-Distribuição de campo Antena Ótima Op2 em 200MHz plano X=0.....	63
Figura 5.24-Distribuição de campo Antena Ótima Op2 em 600MHz plano X=0.....	63
Figura 5.25-Intensidade de campo elétrico para antena Op2 em 200MHz no plano X=2. .	64
Figura 5.26-Intensidade de campo elétrico para antena Op2 em 600MHz no plano X=2. .	64
Figura 6.1-Ponta de proba para medição de campos eletromagnéticos FP-5000	67
Figura 6.2-Antena tipo corneta (<i>Double Ridged Waveguide Horn</i>).	69
Figura 6.3-Esquema do ponto de referência em automóveis	69
Figura 6.4-Vista lateral experimento 1.	70
Figura 6.5-Vista superior experimento 1	70
Figura 6.6-Disposição da antena corneta dentro da CSA	71
Figura 6.7-Resposta da antena tipo Corneta na posição 5	72
Figura 6.8-Antena LPDA modelo ETS 3148.....	73
Figura 6.9-Detalhes físicos da antena.	74
Figura 6.10-Disposição de equipamentos para a medição de VSWR	76
Figura 6.11-Comparação do VSWR medido e o simulado	77
Figura 6.12-Simulação de VSWR em HFSS com frequência central de 600MHz	77
Figura 6.13-Resultado do diagrama de radiação em 400MHz	78
Figura 6.14-Resultado do diagrama de radiação em 700MHz	78
Figura 6.15-Disposição da antena Op2 dentro da CSA do LACE FIAT.....	79
Figura 6.16-Intensidade de campo elétrico em frequência posição 5 antenas LPDA	81
Figura 6.17-Intensidade de campo elétrico em frequência posição 8 antenas LPDA	81
Figura 6.18-Simulação da Intensidade de campo elétrico no espaço livre LPDA Op2.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Air Brake System
AG	Algoritmos Genéticos
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CA	Câmara Anecóica
CR	Câmara de ressonância
CSA	Câmara Semi – Anecóica
DP	Desvio Padrão
FEM	Método dos Elementos Finitos
GPS	Global Position System
HFSS	High Frequency Structure Simulator
IEM	Interferência Eletromagnética
LACE	Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética
LPDA	Log - Periodic Dipole Antenna
MoM	Método dos Momentos
NEC	Numerical Electrical Code
RCS	Radar Cross Section
RF	Rádio Frequência
SEM	Sensibilidade Eletromagnética
SWR	Taxa de Onda estacionaria
TLS	Transmission Line System
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

1. INTRODUÇÃO

O incremento do número de aparelhos elétricos e eletrônicos presentes na constituição de um automóvel (painéis eletrônicos, sistema de bloqueio de freios (ABS), *airbags*, controle de combustível, alarme, sistema de posicionamento global (GPS) e a própria injeção eletrônica, entre outros), deixa perceber a difícil tarefa de planejar estes sistemas desde o ponto de vista da Compatibilidade Eletromagnética (CEM).

Existem várias fontes de interferência eletromagnética em faixas distintas do espectro de frequências, que irradiam campos elétricos em diferentes ambientes urbanos, tornando evidente o problema da Susceptibilidade Eletromagnética (SEM) em sistemas e equipamentos. Além disso, o efeito da ressonância dentro do carro pode incrementar a intensidade destes campos muito acima do valor externo. Por tal razão, os componentes do sistema elétrico do automóvel devem ser projetados para serem imunes a possíveis perturbações presentes no entorno.

Embora os ensaios de CEM para automóveis possam ser feitos em campo aberto, a qualidade das medidas pode ser comprometida pela presença de outros sinais existentes diferentes aos estabelecidos nos testes e procedimentos descritos em normas internacionais. Para evitar este tipo de ocorrências, a maioria dos testes de SEM em veículos e equipamentos eletrônicos são realizados em Câmaras Semi-Anecóicas (CSA) ou em câmaras de ressonância (CR). No entanto, estes testes são feitos nas últimas etapas de fabricação e, posteriormente, são corrigidos os problemas de interferência eletromagnética, fato que aumenta os custos de produção do automóvel.

Frente a este cenário, a experiência em outras áreas da indústria deixa claro que a solução mais econômica e prática, para vários problemas de projeto, é a análise por meio de simulações com métodos analíticos e numéricos. Estas ferramentas têm grande importância na hora de detalhar os efeitos causados pelos campos eletromagnéticos externos nos aparelhos eletrônicos; porém, estes resultados têm de ser validados com testes reais e reconhecidos, dado que a complexidade apresentada pela geometria dos modelos, na hora de realizar as simulações, poderia não estar de acordo com situações verdadeiras.

Este tipo de estudos permite conhecer a distribuição de campos eletromagnéticos dentro do veículo; com esta informação, os projetistas decidem posicionar cabos e sistemas eletrônicos em regiões especiais a fim de reduzir a interferência e intensidade dos campos eletromagnéticos. Desta maneira, aumenta-se a segurança e melhora-se o desempenho dos veículos em ambientes urbanos. Desde este ponto de vista, é indiscutível que para conferir os resultados da simulação é preciso realizar testes prévios em instalações apropriadas para este propósito.

No Brasil, existem alguns laboratórios adequadamente equipados para realizar testes de SEM e interferência eletromagnética (IEM) a nível industrial (em automóveis, aeronaves, satélites, etc.). Um exemplo destes centros é o Laboratório de Integração e Testes (LIT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que possui a infra-estrutura apropriada para tal fim [2].

Apresentada a situação anterior, a empresa fabricante de automóveis FIAT SA. desenvolveu na área de experimentação elétrica o Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética (LACE) localizado na fábrica em Betim – MG. O LACE conta com uma CSA de pequeno porte e com tamanho que a câmara tem é difícil instalar equipamentos de radiação eletromagnética junto com o automóvel.

O projeto de pesquisa **“Correlação de medidas de campos eletromagnéticos irradiados em câmaras Semi-Anecóicas de grande porte e de dimensões reduzidas”** foi desenvolvido por quatro universidades do Brasil em parceria com a FIAT automotores SA e o apoio do CNPq.

Neste projeto universidade empresa, procura-se submeter as centrais eletrônicas do veículo aos mesmos níveis de radiação eletromagnética segundo montagens normalizadas. Portanto, o projeto propõe uma nova metodologia baseada na hipótese de que a maioria da eletrônica embutida no automotor encontra-se na parte frontal veículo, como é apresentado na figura 1.1.

Igualmente na figura 1.1, observa-se uma concentração de sensores, atuadores, comandos eletrônicos e conseqüente concentração dos cabos de conexão e alimentação dos sistemas na região frontal do veículo (Cortesia da FIAT) [3].

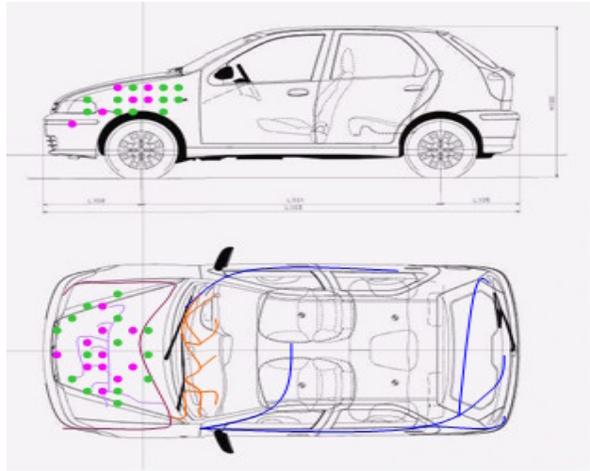


Figura 1.1-Distribuição aproximada de elementos elétricos e eletrônicos no automóvel.

Nesta nova proposta para realização de testes, há um protótipo de automóvel convencional da metade das dimensões reais de um automóvel padrão como indica a figura 1.2. Ainda nesta proposta pretende-se reproduzir testes de CEM e avaliar a IEM de equipamentos eletrônicos, além de correlacionar os dados obtidos com simulações realizadas com métodos matemáticos.

Estes são validados verificando o grau de correspondência de medições realizadas em um veículo completo, tendo como padrão as medições e dados adquiridos nos ensaios realizados em automóveis no laboratório ELASIS (situado em Pomigliano D'arco Napolis – ITALIA com automóveis tipos) [3].

Segundo as normas internacionais, o elemento radiador que gera a distribuição de campo eletromagnético na CSA na realização das provas de CEM em automóveis, depende do tipo de teste a ser realizado. Para esta situação, neste trabalho foi projetada uma antena Log-periódica de dipolos (LPDA) que foi levada a um processo de otimização usando a teoria dos algoritmos genéticos (AG) com o objetivo de diminuir as dimensões físicas do elemento e melhorar a resposta frente a uma antena LPDA convencional



Figura 1.2-Protótipo de automóvel FIAT PALIO cortado pela metade [3].

Em particular, o projeto da antena visa estabelecer a distribuição de campo elétrico adequado para efetuar os testes de CEM realizados na CSA segundo normas internacionais.

Mediante códigos comerciais estudou-se a resposta da antena e a distribuição de campo elétrico do elemento radiador no espaço livre (condições similares às encontradas na CSA do LACE). Depois os resultados foram analisados e comparados com os testes realizados no laboratório com o propósito de efetuar uma validação. Vista a complexidade envolvida neste assunto, o objetivo desta dissertação foi dividido de forma a facilitar o projeto realizado em conjunto com as outras universidades. Por tanto, este texto está distribuído da seguinte maneira:

O segundo capítulo resume os principais conceitos de CEM de maneira geral, ressaltando o ambiente eletromagnético em automóveis, além de uma breve introdução aos componentes da Câmara Anecóica e descrição da CSA do LACE.

O terceiro capítulo faz uma revisão bibliográfica das normas nacionais e internacionais que atuam na área de CEM em automóveis. Adicionalmente, é feita uma revisão dos trabalhos realizados na área de testes para a avaliação de IEM e CEM em ambientes urbanos e automotores. Este capítulo também destaca as normas relevantes para os testes de IEM e CEM em veículos.

O quarto capítulo apresenta os critérios técnicos da escolha e projeto da antena, junto com as simulações realizadas empregando um código comercial baseado no Método dos Momentos (MoM). De maneira complementar, foram feitas simulações usando uma outra ferramenta baseada na teoria dos Elementos Finitos (FEM).

No quinto capítulo descreve-se a teoria dos algoritmos genéticos (AG), e o procedimento de otimização da antena. Mostra-se também uma análise de resultados baseados nas simulações com os códigos comerciais, estabelecendo as características da antena final.

O sexto capítulo é dedicado ao procedimento de construção da antena junto com os testes realizados para a avaliação das principais características desta. O procedimento dos testes para a análise da distribuição de campo na CSA, a calibração de antenas no LACE e a discussão dos resultados das simulações de distribuição de campo elétrico é apresentada também.

O sétimo e último capítulo, apresenta as principais conclusões do trabalho bem como a proposta para a continuação de futuras pesquisas.

2. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM AUTOMÓVEIS

2.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

Um sistema, dispositivo ou equipamento é compatível eletromagneticamente quando funciona harmoniosamente com outros equipamentos no mesmo ambiente eletromagnético coexistindo sem interferência mútua [1]. Dentro do ambiente eletromagnético, que é o conjunto de fenômenos eletromagnéticos existentes em um local, existem agentes emissores ou geradores de energia eletromagnética; energia que é conduzida para o ambiente pelos mesmos equipamentos elétricos ou eletrônicos existentes no entorno.

Dentro deste esquema, a degradação do desempenho dos sistemas, equipamentos e canais de transmissão, causada por perturbações eletromagnéticas é conhecida como Interferência Eletromagnética (IEM). A interferência que é recebida por radiofrequência ou por um meio não conduzido, numa circunstância onde a fonte e o elemento encontram-se eletricamente distantes, é conhecida como interferência irradiada. Nas situações em que o elemento irradiado e a fonte encontram-se num ambiente eletricamente curto, a interferência é conhecida como de campo próximo ou definida como *crosstalk* [4].

2.2 SENSIBILIDADE E IMUNIDADE ELETROMAGNÉTICA

A Imunidade Eletromagnética define-se como a capacidade de um equipamento ou sistema para tolerar a Interferência Eletromagnética (IEM) presente no ambiente. Esta interferência associa-se ao sistema por acoplamentos desejados ou indesejados, conduzidos ou irradiados. Assim, a Sensibilidade Eletromagnética (SEM) é a falta de imunidade eletromagnética ou a falta de tolerância em determinado nível de imunidade eletromagnética.

Os testes para a avaliação de imunidade eletromagnética são realizados em equipamentos eletrônicos e, especialmente, nos veículos que procuram encontrar o nível de imunidade dos equipamentos embutidos. Estes testes são baseados em várias normas internacionais, documentos que incluem considerações sobre o controle e redução de IEM, assim como

procedimentos para a elaboração dos testes [4]. Estes procedimentos estão orientados para garantir que:

- O sistema não seja susceptível à interferência de outro sistema.
- O sistema não seja susceptível à interferência proveniente de si mesmo.
- O sistema não seja a fonte de interferência para outros sistemas.

2.3 AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO DO VEÍCULO.

O ambiente eletromagnético de um veículo está definido por valores e grandezas elétricas tais como tensões e correntes nos condutores ou campos eletromagnéticos no espaço, consequência dos fenômenos eletromagnéticos que estão presentes e que envolvem o automóvel [5]. Dado que os veículos não são equipamentos estacionários e que estão sujeitos a diversos ambientes eletromagnéticos segundo a mobilidade, estes podem ser divididos em ambiente interno e externo [1], [4].

2.3.1 Ambiente interno

No ambiente interno estão considerados os eventos temporários e contínuos de interferência que são criados dentro do próprio veículo. O próprio automóvel pode ser fonte de IEM para si mesmo dado que possui geradores de radiofrequência e sistema de ignição entre outras fontes de ruído como é ilustrado na figura 2.1.

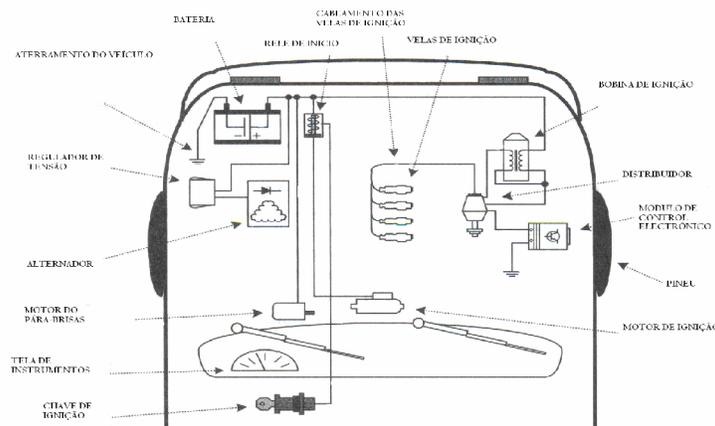


Figura 2.1-Ambiente eletromagnético interno do automóvel.

2.3.2 Ambiente externo

O ambiente externo tem como característica principal a influência de fontes de IEM externas ao veículo. Estas IEM são geradas pelos serviços de telecomunicações, por fenômenos como descargas elétricas atmosféricas e pela contribuição das emissões dos equipamentos dentro de veículos próximos [4].

Na figura 2.2 são apresentados os fatores que envolvem o ambiente EM externo do veículo. Neste trabalho estudam-se as principais características a serem consideradas segundo as normas existentes para a análise de IEM e da SEM em automóveis no ambiente eletromagnético externo devido a fontes intencionais.

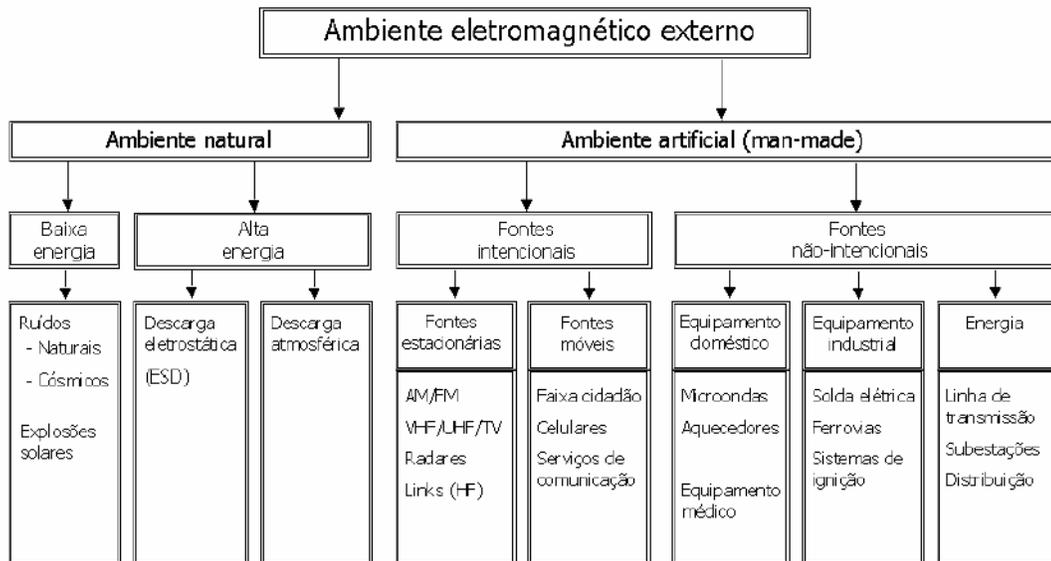


Figura 2.2- Ambiente eletromagnético externo do veículo [1].

As fontes intencionais estão agrupadas em faixas de radiofrequência, classificação importante para identificar serviços com fontes potenciais de interferência. Esta parte do espectro eletromagnético está dividido nas seguintes faixas: LF (<300kHz), MF (300kHz – 3MHz), HF (3MHz – 30MHz), VHF (30MHz- 300MHz), UHF (300MHz – 3GHz), SHF (3GHz – 30 GHz) e EHF (30GHz – 300GHz).

2.4 CÂMARA ANECOICA

As câmaras anecóicas são empregadas para a preparação de testes de CEM e avaliação de SEM em diferentes sistemas e equipamentos segundo as normas internacionais. Os testes envolvem radiação eletromagnética em equipamentos ou procedimentos para a avaliação do nível de emissão de IEM dos mesmos. Existem diferentes tipos de Câmara Anecóica (CA) para cada aplicação na área da eletrônica, da indústria automotiva, aeroespacial, militar e telecomunicações entre outras.

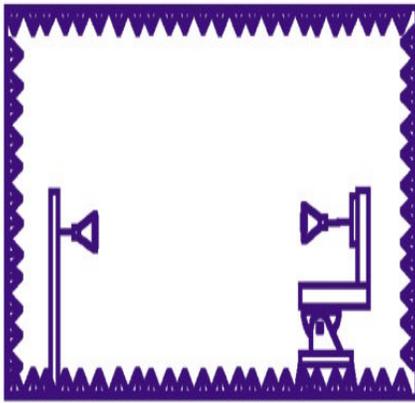
Essencialmente uma CA é um espaço fechado especialmente blindado para evitar ao máximo a presença de sinais de Radiofrequência (RF) ou interferências eletromagnéticas externas que possam interferir nos testes desenvolvidos no interior. Por outro lado, como nos testes são empregados elementos de radiação eletromagnética, estas câmaras possuem elementos absorvedores de radiofrequência que evitam a reflexão dos sinais presentes no interior da câmara simulando um ambiente parecido com o espaço livre. Esta condição é possível já que as superfícies internas da câmara possuem absorvedores que apresentam perdas na propagação das ondas de radiofrequência [6].

2.4.1 Tipos de câmara anecóica

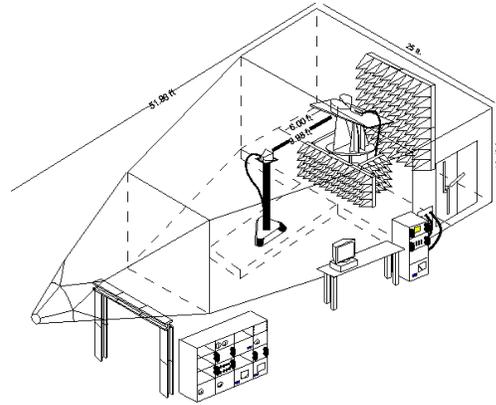
As câmaras anecóicas podem se classificar por forma, tamanho e distribuição dos absorvedores de RF no interior [7].

Em relação à forma, existem basicamente dois tipos de câmara: a retangular e a tipo corneta (*tapered*)-figura 2.3. A forma depende do tipo de avaliação eletromagnética que se deseja realizar. Na câmara retangular, normalmente são realizados testes para caracterização de antenas, *Radar Cross Section* (RCS) e avaliação de CEM.

Cada uma das câmaras possui características diferentes como é o caso das empregadas em testes com aeronaves e satélites. Na câmara de tipo corneta também são elaborados testes de IEM e CEM em equipamentos e antenas, mais também é aproveitado o fato da geometria da câmara oferecer vantagens na redução de reflexões dos sinais gerados. Existe uma variação desta última, conhecida como corneta dupla. A mesma foi desenvolvida para melhorar os testes em baixa frequência realizados em câmaras retangulares com plano terra, aprimorando os efeitos da reflexão de sinais.



a)



b)

Figura 2.3 Formas típicas de câmara anecóica. a) Câmara retangular, b) Câmara cônica.

Com relação ao tamanho, as CSA, estas se classificam em câmaras de grande e pequeno porte. Em CA de grande porte são realizadas experiências em grandes sistemas; é o caso de caracterização eletromagnética de antenas, satélites ou aeronaves como se apresenta na figura 2.4. Nas câmaras de pequeno porte são realizados testes de CEM e SEM em equipamentos eletrônicos, assim como a avaliação de emissão de IEM proveniente dos equipamentos em teste.



Figura 2.4-Câmara Anecóica de grande porte. Avaliação de CEM em aeronaves (Laboratórios Boeing)

Esta categoria de câmaras está subdividida em instalações de 3m (tipicamente de 9,5m x 6,5m x 5,7m), 5m (11,5m x 7m x 6m) e de 10m (19m x 13m x 8,5m). Esta é a distância representativa entre o equipamento em teste e o elemento medidor segundo normas internacionais [8].

Uma CA é conhecida como Completamente Anecóica quando tem distribuídos em cada uma das paredes, teto e chão uma camada de absorvedores. Caso estiver ligeiramente coberta chama-se de Parcialmente Anecóica. Finalmente, quando a câmara não tem absorvedores no chão e em troca tem plano-terra é conhecida como Câmara Semi-Anecoica (CSA).

2.4.2 Elementos absorvedores.

Os absorvedores de RF são os materiais que cobrem as superfícies do interior do espaço de teste e desempenham o papel mais importante no funcionamento da câmara. Estes estabelecem o limite em frequência para o funcionamento das provas. Existem três tipos básicos de absorvedores:

- Absorvedores piramidais para microondas: São absorvedores dielétricos que promovem a perda ôhmica da energia da onda incidente no material. Materiais como carbonos (grafite, negro de fumo e carbono vítreo), são ideais para altas frequências nas faixas de 100MHz a 18 GHz. O uso destes absorvedores está limitado às suas dimensões físicas, por exemplo, para uma frequência de 30MHz o tamanho do absorvedor é de 2,4m.
- Absorvedores magnéticos: Estes absorvedores apresentam perdas magnéticas para o ambiente graças às características de permeabilidade magnética (μ) e de histerese que possuem. São constituídos de diferentes combinações de ferrita, especiais para baixas frequências (na faixa de 30 até 1000MHz). Geralmente são pesados e em forma de telha. [8].

- Absorvedores híbridos: Estes elementos combinam as características das perdas elétricas e magnéticas com o objetivo de aumentar a largura de banda das instalações de teste.

2.5 CSA DO LACE

Os testes nas antenas existentes do LACE e na antena projetada, foram realizados na Câmara Semi Anecóica (CSA) do Laboratório de Antenas e Compatibilidade Eletromagnética (LACE) da FIAT. As características da câmara são as seguintes:

- Dimensões externas: 6,5 m x 5,5 m x 3,3 m
- Espaço útil com absorvedores: 5 m x 3,8 m x 2,4 m
- 1 porta blindada de 0,9 m x 2,1 m operada manualmente
- 1 porta blindada de 3 m x 2,5 m operada pneumaticamente
- 2 filtros de 32 A e 60 Hz para alimentação dos equipamentos

A CSA possui um sistema de monitoramento em tempo real que realiza o controle de equipamentos como gerador de sinais, amplificador de RF e recursos de medição (antenas e pontas de prova) – figuras 2.5 e 2.6. Este sistema de controle foi desenvolvido pelo fabricante dos equipamentos (Rohde & Schwarz).

Uma das vantagens deste sistema é o controle de equipamentos e aquisição de dados em tempo real que permite gerar relatórios para a análise dos dados dos testes. Por outro lado, o software não é flexível a mudanças nos parâmetros dos testes o que constitui uma desvantagem do sistema. A configuração do software está programada unicamente para seguir as especificações das normas.



Figura 2.5-Câmara Semi Anecóica do LACE - FIAT [3]



Figura 2.6-Equipamentos de controle e teste do LACE.

Segundo [10], os absorvedores da CSA têm como objetivo reduzir a energia refletida na área de teste no mínimo em 10dB, esse fator depende da eficiência da câmara, característica que está relacionada diretamente com a geometria e material dos absorvedores nas superfícies da câmara. Na tabela 2.1 está indicada a eficiência da CSA do LACE frente a campos elétricos e magnéticos.

Tabela 2.1-Eficiência de blindagem da CSA do LACE.

	Frequência	Atenuação (dB)
Campo Magnético	1 kHz.	20
	10 kHz.	56
	200 kHz.	100
Campo elétrico	200 kHz -50 MHz.	100
	50 MHz -10 GHz.	100

3. NORMAS

As normas relacionadas com CEM em veículos são dinâmicas. Este dinamismo é associado à necessidade de harmonizar os fundamentos das normas internacionais e nacionais, junto com a constante mudança na tecnologia das linhas de produção de companhias fabricantes e o comportamento das fontes eletromagnéticas no entorno urbano.

3.1 NORMAS INTERNACIONAIS NA ÁREA AUTOMOTIVA

Várias normas aplicadas à avaliação e controle da SEM e CEM em veículos têm sido publicadas nos últimos anos por várias entidades reconhecidas. Estes documentos são resultado das conclusões de um grupo de pesquisadores especialistas ao redor do mundo, que trabalham para produzir uma normativa econômica e tecnicamente possível. É importante entender a estrutura dos órgãos autores destas normas para poder visualizar um panorama completo em termos da sua aplicação e alcance.

As normas internacionais para aplicações automotivas são de autoria das seguintes organizações [1],[5], [9]:

- **ISO:** *International Organization for Standardization*, Organização internacional que aglomera os grêmios de standardização de 148 Países, representada nos EUA pela ANSI e no Brasil pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- **FCC:** *Federal Communications Commissions*, Órgão regulador da área de telecomunicações e radiodifusão dos EUA que atua desde 1933. Nos EUA, todo o equipamento elétrico ou eletrônico produzido ou comercializado deve ter um registro na FCC. O homologado da FCC no Brasil é a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL.
- **CISPR:** O *Special International Committee for Radio Interference*, que faz parte do **IEC** - *International Electro technical Commission*, é a área especializada na área elétrica e eletrônica responsável pela emissão de documentação técnica para produtos automotivos desde 1993.

- **SAE:** *Society of Automotive Engineers*, organização americana que coordena a emissão de normas para a área automotiva e aeroespacial em parceria com a **ANSI** - *American National Standards Institute*.
- **EC:** Comunidade européia. Grupo de normativas que são publicadas no diário oficial da comunidade européia. Incorporou a diretiva 95/54/EC em 1995 e é aplicada a todos os países desta Comunidade.

A tabela 3.1 apresenta um resumo das principais normas na área de EMC para veículos publicadas por cada uma das entidades anteriormente mencionadas.

Tabela 3.1-Principais normas para o estudo de CEM e IEM em automóveis e componentes eletrônicos [8].

Norma	Órgão	Aplicação	Data
95/54/EC	EC	Documento atualizado pela 2004/104/EC, Requerimentos de CEM aplicáveis a veículos e equipamentos embutidos. Documento baseado na diretiva 72/245/EEC e 70/156/EEC.	1995/2004
Anexo IV		Metodologia de medição de emissões eletromagnéticas de banda larga radiadas por veículos.	
Anexo V		Metodologia de medição de emissões eletromagnéticas de banda curta radiadas por veículos.	
Anexo VI		Metodologia para teste de IEM em veículos.	
Anexo VII		Metodologia de medição de emissões eletromagnéticas de banda larga radiada por equipamentos.	
Anexo VIII		Metodologia de medição de emissões eletromagnéticas de banda curta radiadas por equipamentos.	
Anexo IX		Metodologia para teste de IEM em equipamentos.	
ISO 11451	ISSO	Distúrbios elétricos causados por fontes externas em veículos automotivos.	1995-2001
ISO 11452		Distúrbios elétricos causados por fontes externas em equipamentos eletrônicos ou gerados por estes.	1995-2001
CISPR-12	IEC	Limites e métodos de medição para perturbações eletromagnéticas geradas por veículos e motores	1995

CISPR-25		Limites e métodos de medição de perturbações eletromagnéticas em receptores empregados em veículos.	1995
SAE J551	SAE	Testes para veículos.	
-2		Limites e metodologia para medidas de emissões eletromagnéticas radiadas por veículos.	
-4		Limites e metodologia para medidas de emissões eletromagnéticas radiadas por equipamentos.	
-11		IEM em veículos devido a fontes externas “ <i>off – vehicle</i> ”.	
-12		IEM em veículos devido a fontes a bordo “ <i>on –board</i> ”.	
-13		IEM em veículos metodologia “ <i>Bulk Current Injetion</i> ”.	1995-
SAE J1113		Testes para equipamentos	1995-1999
-21		Procedimento de medida de CEM e IEM de componentes em veículos para frequências de 10 kHz a 18GHz.	
-25		Procedimento de medida de CEM e IEM de componentes em veículos para frequências de 10 kHz a 1GHz.	
-41		Limites e metodologia para medições de distúrbios por radiofrequência para componentes e módulos embutidos.	

Cada uma das normas apresenta diferenças entre si embora tenham a mesma finalidade. Por exemplo, a SAE não aceita testes com antenas tipo *stripline* como um método confiável na realização de testes de CEM. Da mesma maneira, a ISO não adota os métodos indicados pela SAE já que desde o ponto de vista europeu, as normas internacionais são empregadas como regulação no mercado [9].

Com o intuito de estabelecer critério único na hora de seguir algumas das normas anteriormente citadas, existem referências cruzadas. A tabela 3.2, por exemplo, relaciona algumas das normas SAE aplicadas ao estudo de CEM em automóveis com o equivalente correspondente das normas ISO.

Tabela 3.2-Referência equivalente entre normas ISO e SAE para CEM em automóveis

Normas SAE	Normas ISO
SAE J551-1	ISSO 11451-1
SAE J551-11	ISSO 11451-2
SAE J551-12	ISSO 11451-3
SAE J551-13	ISSO 11451-4
SAE J1113-1	ISSO 11452-2
SAE J1113-3	ISSO 11452-7
SAE J1113-4	ISSO 11452-4
SAE J1113-21	ISSO 11452-2
SAE J1113-23	ISSO 11452-5
SAE J1113-24	ISSO 11452-3

Tabela 3.3-Estrutura da Norma ISO 11451.

Norma	Título	Parte	Data
ISSO 11451	Veículos automotivos — Metodologia para testes referentes a distúrbios ocasionados por energia eletromagnética de banda estreita em veículos.		
	Parte 1: Generalidades e definições.	1	2001
	Parte2: “ <i>Off-vehicle</i> ” fontes de radiação externa	2	2001
	Parte 3: <i>On-board</i> – simulado	3	1994
	Parte 4: <i>Bulk current injection</i> (BCI), Método da bobina de injeção de corrente.	4	1995

Tabela 3.4-Estrutura da Norma ISO 11452.

Norma	Título	Parte	Data
ISSO 11452	Veículos automotivos — Metodologia para testes referentes a distúrbios ocasionados por energia eletromagnética de banda estreita em componentes.		
	Parte 1: Generalidades e definições	1	2001
	Parte 2: Câmara com absorvedores (1995)	2	2001
	Parte 3: Cela de Modo transversal eletromagnético (TEM)	3	2001
	Parte 4: <i>Bulk current injection</i> (BCI), método da bobina de injeção de corrente.	4	2001
	Parte 5: Stripline	5	2002
	Parte 6: Antena de placas paralelas	6	1997
	Parte 7: Injeção direta de energia em radiofrequência	7	1995

O presente trabalho está baseado nas normas do padrão ISO considerando alguns elementos da normativa da comunidade europeia 95/54/EC [12] e a mais recente atualização 2004/104/EC [13]. De outra parte, as normas ISO aplicadas a testes em veículos estão divididas em dois grupos, as relacionadas a testes realizados com fontes de radiação externa – ISO 11451 [10] e as concernentes a testes em componentes eletrônicos embutidos ou individuais - ISO 11452 [11]. As tabelas 3.3 e 3.4 citam os principais tópicos tratados em cada um dos grupos da norma

3.2 DISPOSIÇÃO DOS TESTES

Na norma ISO 11451-2, está especificado o método para testar a imunidade e avaliar a IEM em veículos no ambiente externo. Mais especificamente, esta norma estabelece o procedimento para a realização de testes considerando distúrbios elétricos atribuídos a fontes externas ao veículo, independentemente do seu sistema de propulsão.

As perturbações eletromagnéticas consideradas estão limitadas a um campo eletromagnético em estado permanente. É o usuário quem especifica o nível da intensidade de campo elétrico aplicado, assim como as faixas de frequência a serem empregadas nos

testes, mesmo que o nível na norma seja de 25 V/m a 100 V/m e as faixas de frequências sejam de 0.1 a 18000 MHz.

Na tabela 3.5 são apresentados os níveis de intensidade com valor eficaz de campo elétrico sugeridas em [10]. A faixa de frequências escolhida para o estudo foi de 200 MHz até 1GHz, as razões desta escolha serão apresentadas no capítulo 4.

Tabela 3.5-Níveis de intensidade de campo elétrico segundo ISO 11451-2:2001

Nível de intensidade do teste	Valor [V/m]
I	25
II	50
III	75
IV	100

A norma estabelece a realização de experiências em ambiente fechado, especificamente em câmara anecóica (CA), com o intuito de simular as condições de espaço livre e manter o sinal isento de impurezas eletromagnéticas ou gerar perturbações para estações de transmissão próximas. Uma representação da montagem padrão para este tipo de testes é apresentada na figura 3.1.

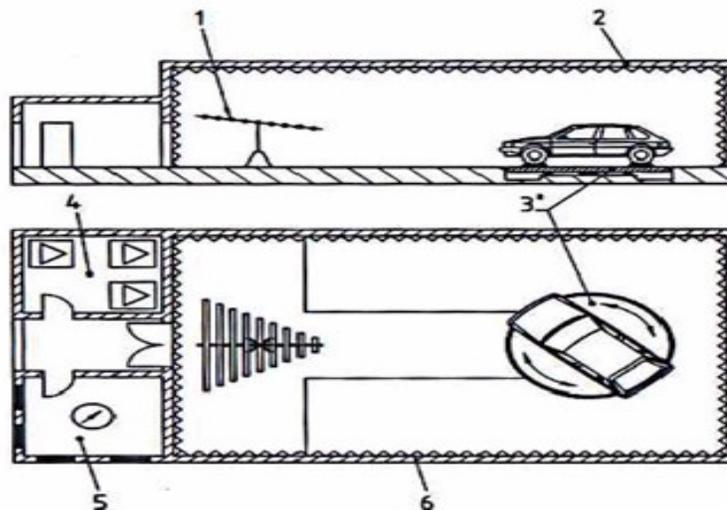


Figura 3.1-Esquema da montagem definida para a análise de IEM e CEM em automóveis empregando CSA - ISO 11451-2:2001. 1- Antena; 2- câmara blindada; 3- Bancos dinamométricos e plano girante; 4- sala de amplificadores, 5- Sala de monitoramento; 6- Material Absorvente de RF.

A seguir são descritas as condições geométricas para a realização dos testes, também são incluídas considerações relacionadas com o desempenho do local das provas mencionadas em [10].

- Os componentes do elemento de radiação não podem estar a uma distância inferior a **0,5m** de qualquer material absorvedor na CA, nem inferior a **1,5m** da parede de blindagem da câmara.
- Nenhuma parte da antena de radiação poderá estar a uma distância inferior a **0,5m** da superfície externa do automóvel.
- O centro de fase da antena deve estar separado pelo menos **2 m** horizontalmente do ponto de referência do automóvel.
- Nenhuma parte dos elementos radiantes da antena estará a uma distância inferior a **0,25m** do solo.
- Os absorvedores da câmara devem garantir uma redução da energia refletida na região de teste de no mínimo 10dB.

Comparando, citam-se algumas das condições de teste estabelecidas em [12] assim:

- Os componentes do elemento de radiação não podem estar a uma distância inferior a **1m** de qualquer material absorvedor da CA, nem inferior a **1,5m** da parede de blindagem da instalação. Não pode ter material absorvedor entre a antena e o veículo.
- Nenhuma parte da antena radiante poderá estar a uma distância inferior a **0,5m** da superfície externa do automóvel.
- O centro de fase da antena não deve estar a menos do que **1.5m** com relação ao plano onde o veículo em teste repousa, e deve estar separado pelo menos **2 m** horizontalmente do ponto de referência do automóvel.

- Nenhuma parte da antena pode estar a uma distância menor que **0.25m** em relação ao plano onde o veículo em teste repousa.
- O elemento radiador deve estar afastado do veículo o mais tecnicamente possível, na faixa de 1 a 5m.

As duas situações são similares, a diferença está na distância do elemento radiador ao absorvedor. A situação mais crítica corresponde à descrita em [10], tal situação é ilustrada na figura 3.2.

Considerando o uso do protótipo automotivo da figura 1.2, e uma antena com até 1.5m de comprimento, o procedimento de teste de CEM em CSA do LACE da FIAT pode ser realizado obedecendo com as condições da norma.

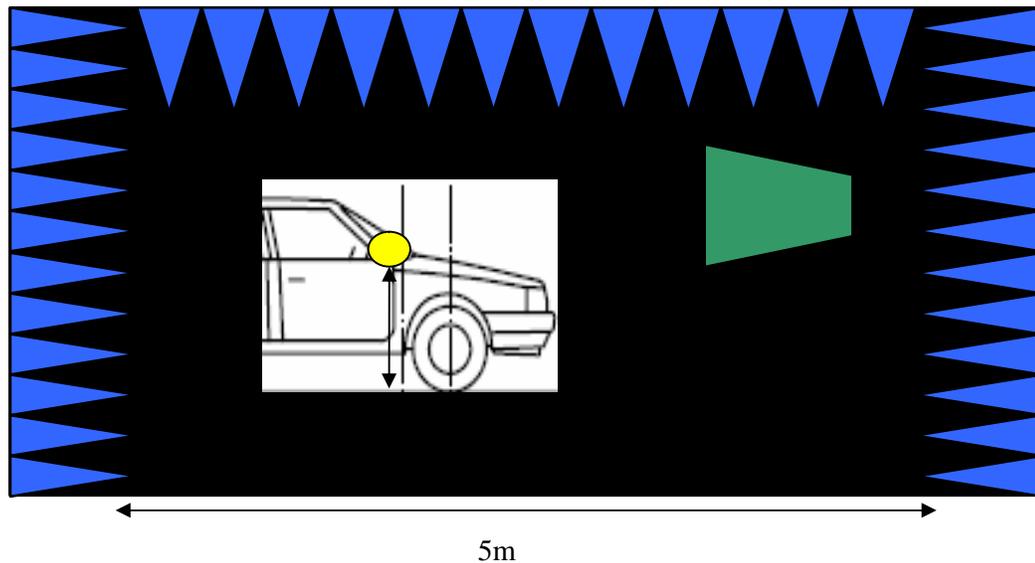


Figura 3.2-Disposição geométrica do elemento radiador e veículo em teste segundo normativa ISO 11451-2 e 95/54/EC

Com a atualização da normativa 95/54/EC, algumas mudanças foram incorporadas nas áreas de teste. Estas mudanças estão relacionadas com o aumento da frequência de 1GHz para 2GHz e a realização do teste com frequência modulada (AM) para frequências na faixa de 20MHz até 800MHz. Para frequências superiores, recomenda-se fazer os testes

com modulação por pulso (PM), que poderia representar a codificação empregada nas comunicações celulares [13].

3.3 NORMAS NACIONAIS

No Brasil as normas para a avaliação da CEM estão concentradas nas atividades de controle de radiações eletromagnéticas não ionizantes. Estas atividades de fiscalização são efetuadas pela Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL. Dentro da normativa são estabelecidos os limites de radiação eletromagnética em áreas urbanas [14], valores que estão resumidos na tabela 3.6 comparados com os níveis máximos estabelecidos pelas normas internacionais.

Tabela 3.6-Limites para a exposição de campos eletromagnéticos estabelecidos pelas normas aplicáveis a frequências entre 200 e 1000MHz

Normativa	Nível Máximo de campo eletromagnético [V/m]
ANATEL Resolução No.303 2/07/2002	43,48 (calculado em 1GHz)
95/54/EC e atualizações	24 (Aplicado pelo menos ao 90% da faixa de frequência do teste)
ISO 11451	100 (campo eletromagnético em espaço livre ou CSA)

Na normativa da ANATEL, os limites mencionados constam da publicação “*Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*”, *Health Physics Vol. 74, N° 4, pp 494-522, 1998*”, cuja tradução e reprodução foi realizada com a permissão da *Health Physics Society*. A tradução para o português, da mencionada publicação, foi contratada junto à Associação Brasileira de Compatibilidade Eletromagnética – ABRICEM, realizada pelo Grupo de Trabalho de Efeitos Biológicos daquela entidade [14].

Na tabela 3.6, o valor publicado é o resultado da condição para exposição a campos eletromagnéticos ao público em geral e avaliado por $1,375 \cdot f^{1/2}$ (f em MHz) na faixa de 400 a 2000 MHz. Na faixa de 10 a 400MHz é de 28V/m para todos os casos.

Por outro lado, dado que no Brasil não existe companhia fabricante de veículos de marca Brasileira, ainda não foi publicada uma norma para a avaliação de CEM, IEM ou SEM em automóveis que atendam as exigências do ambiente eletromagnético presente (que não ultrapasa de 20V/m) [1]. As empresas fabricantes com sede no Brasil seguem padrões das casas matrizes ou normas internacionais, no caso da FIAT, os estudos são referenciados às normas ISO.

CONCLUSÕES

Os órgãos que estabelecem as normas nacionais e internacionais estão esforçando-se para achar um consenso e alinhar conceitos, procedimentos e níveis para a avaliação da IEM e SEM em automóveis. No entanto, não está disponível um documento equivalente que permita aos fabricantes usar como guia frente aos processos de validação da CEM dos equipamentos elétricos e eletrônicos incluídos nos automóveis.

Nos últimos anos, um avanço nas atualizações das normas, incluiu o aumento nas frequências de testes e diminuição do nível de intensidade de campo elétrico na realização dos testes, assim como a consideração frente ao tipo de modulação de sinais empregados.

O fato de considerar uma intensidade de campo elétrico de 100 V/m na realização dos testes, está ligado aos fatores de saúde e segurança que visam contemplar efeitos de ressonância dentro do veículo.

O limite de 2GHz no caso da normativa da Comunidade Européia, não abarca serviços como o bluetooth (2.45GHz) ou serviços de transmissão de dados distribuída por radiofrequência (Wi-Fi – Wimax).

4. PROJETO DE ANTENA

Dentro dos procedimentos descritos para a realização de testes de CEM e IEM em automóveis, as normas internacionais apresentam duas maneiras de caracterizar o elemento de radiação externo. Um é o método da linha de transmissão -*Transmission Line System* (TLS) e outro, o emprego de antenas convencionais [10]-[13].

O TLS é o método empregado para fazer testes na faixa de 100 kHz a 30MHz. Este equipamento é diferente para cada tipo de prova. Assim, para análise de CEM e IEM em elementos e equipamentos eletrônicos [11], emprega-se uma configuração de teste como a indicada na figura 4.1a.

O dispositivo em prova é inserido em uma caixa fechada que consegue transmitir campos eletromagnéticos transversais TEM (TEM cell, uma versão mini de uma CA) [7]. No caso de automóveis, esta estrutura é maior e é conformada pela disposição de uma placa metálica paralela ao plano terra da estrutura blindada (figura 4.1b). Esta placa localizada acima do automóvel é alimentada por uma linha de transmissão, conseguindo gerar os campos desejados.

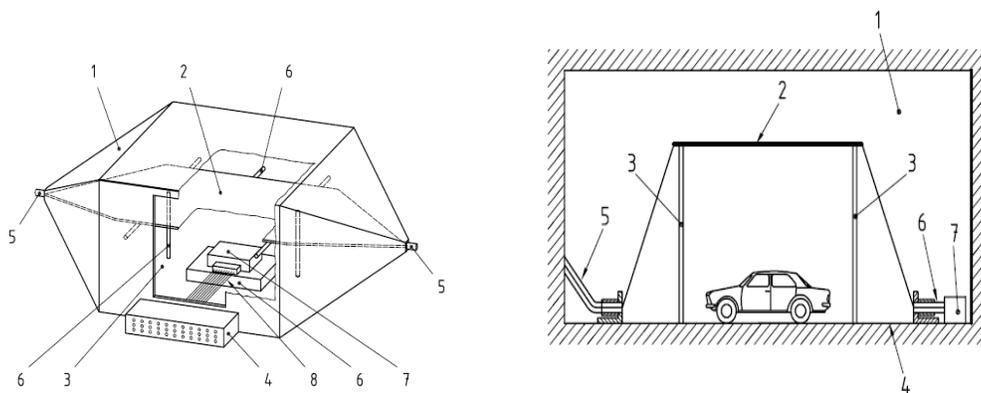


Figura 4.1-Método TLS. A) Método TLS para equipamentos. 1- Blindagem externa, 2- condutor interno, 3- Porta de acesso, 4- Painel de conexão, 5- Conectores coaxiais, 6- Suporte dielétrico, 7- Dispositivo em teste, 8- entrada e saída de cargas. B) Método TLS para automóveis. 1- Blindagem externa (são permitidos absorvedores), 2- Platô condutor ou conjunto de fios, 3- Suporte não metálico, 4- Plano terra, 5- Alimentação da linha de transmissão, 6- Cabo coaxial, 7- Carga [10], [11].

É mais habitual o emprego de antenas em provas que envolvem frequências maiores. As antenas oferecem facilidade de operação e mínima infra-estrutura comparada com o método TLS. Segundo as normas, estas antenas devem ter características técnicas de funcionamento que permitam gerar o nível de campo elétrico necessário para cada faixa de frequência durante o teste.

As normas internacionais não especificam o tipo de antena a ser empregado, no entanto, descrevem-se as características mínimas com as que se deve contar. Por esta razão os próximos tópicos apresentam uma revisão da teoria geral de antenas para determinar a geometria e as características do elemento radiador a ser projetado.

4.1 ESCOLHA DA GEOMETRIA DA ANTENA.

Em uma câmara tipo retangular como a do LACE, é necessário selecionar antenas que minimizem a quantidade de energia que interage com as paredes da câmara, assim como oferecer um campo uniforme na região de prova. As antenas têm que ser calibradas de maneira cuidadosa; já que no final, é a medição que vai determinar a aprovação ou a recusa do dispositivo em prova [7].

Na parte 2 da ISO 11451-2 [10], a faixa de frequência aplicável ao testes é de 100kHz até 18GHz. No entanto, esta faixa só vai até 1GHz em [12] e 2GHz em [13]. Na prática, é necessário uma grande quantidade de antenas, ou um grupo seletivo das mesmas que operem em diferentes faixas e preferivelmente de banda larga. Adicionalmente, ainda são necessários os equipamentos associados ao teste, em especial geradores de sinal e amplificadores de RF.

A largura de banda de uma antena varia com as condições e depende do tipo da antena. Esta característica é expressa em porcentagem no caso das antenas de banda estreita, já que para antenas banda larga é dado pela razão entre a frequência mais alta e a mais baixa [15]. Então, uma antena é banda larga se a impedância e o diagrama de radiação não mudam significativamente em uma oitava ($f_{\text{máx}} / f_{\text{mín}} = 2$) [16].

Fazendo uma revisão de cada uma das antenas existentes na teoria, e começando pelas antenas de fio, o dipolo pode operar na frequência de ressonância que seja necessária. O

impedimento está em que o ganho do dipolo é muito baixo (perto de 2,14dB) e seria necessário o emprego de vários dipolos para cobrir uma faixa interessante de testes.

A largura de banda do dipolo está entre 8 e 16% da frequência central. Por outra parte, devido às dimensões da câmara anecóica disponível no LACE, dipolos de meia onda só poderiam ser usados a partir de 50MHz ($\lambda=3\text{m}$); daí o emprego das células TLS em baixas frequências.

Para a realização dos testes foi escolhida a faixa de 200MHz a 1GHz correspondente à categoria F4 citada na parte dois de [10]. O uso de faixas menores ou maiores seria impedido pelas características físicas e técnicas da câmara e os equipamentos disponíveis.

Os arranjos de dipolos de fio resolvem o problema dos baixos valores do ganho e directividade, melhorando as condições para conseguir a intensidade máxima sugerida pela norma (100 V/m). A relação entre o ganho da antena por campo elétrico (campo distante) e a distância é dada por (4.1),

$$E = \sqrt{\frac{P_{in} * G * \eta}{4\pi R^2}} \quad (4.1)$$

Onde R é a distância da fonte ao elemento em teste dada em metros, G é o ganho numérico ($10^{G[\text{dB}]/10}$), $\eta = 120\pi$ e P_{in} é a potência de entrada na antena em Watts. Deste modo, com 300W de entrada a 2 m de distância é preciso um ganho aproximado de 7,5 dB.

Usando arranjos de dipolos torna-se complicado operar várias frequências; além disto, o espaço reduzido disponível na câmara permitiria no máximo um arranjo com 5 elementos em configuração *endfire* ou *broadside*, fora os equipamentos para o controle de fase [17].

Um outro tipo de arranjo de dipolos é a antena “Yagi-Uda” que consegue aumentar a largura de banda do arranjo anteriormente citado, conservando características de ganho. Esta antena consiste essencialmente de um elemento ativo ou alimentador e elementos “parasitas” ou em curto. Estes elementos “parasitas”, dividem-se em refletores e diretores melhorando a largura de banda em torno de uma frequência central.

A desvantagem é que este tipo de antenas não opera com um ganho uniforme em toda a faixa de frequências de operação, o que não é conveniente para o teste. De outra parte, uma das rotinas na calibração das antenas é a polarização (deve ser horizontal ou vertical) [10]. Isto descarta o uso de geometrias circulares tais como espirais, arranjos de *loop*, helicoidais ente outras.

As antenas que cumprem com o requisito de ganho uniforme, largura de banda de aproximadamente 5:1, capacidade para ser polarizada verticalmente ou horizontalmente conforme as normas internacionais, são as antenas tipo log periódicas de fio (LPDA), a corneta e as biconicas de fio. No presente trabalho, foi escolhida a antena LPDA dada a facilidade de análise, simulação e implementação.

4.2 ANTENA LOG PERIÓDICA DE FIO

As antenas Log periódica de fio (LPDA) são um dos elementos de radiação mais fáceis de projetar, implementar e estudar. É uma das mais comumente empregadas em aplicações de banda larga e, por conseguinte, nos testes de EMC, SEM [31]. Existem equações para calcular o tamanho e o espaçamento entre os fios que compõem a LPDA, fazendo que os componentes sejam proporcionais em tamanho de um para o outro. Essa geometria (figura 4.2) força a impedância da antena junto com as propriedades de radiação a se repetir periodicamente com o logaritmo da frequência.

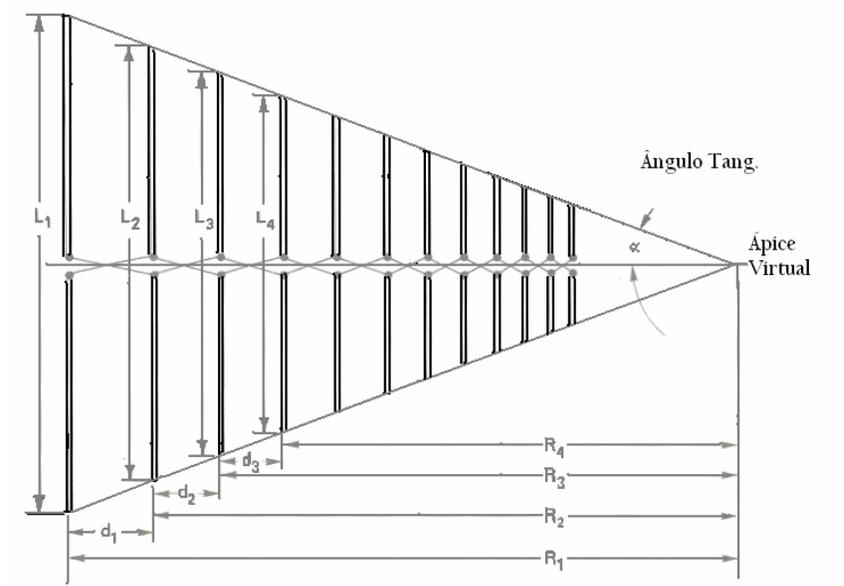


Figura 4.2-Geometria típica de uma LPDA

A largura de banda da antena aumenta com o número de elementos; assim, o desempenho da LPDA é em função do espaçamento entre fios e diâmetro de cada componente. O comprimento dos elementos da antena e o espaçamento entre fios está determinado por o fator de escala (τ) e o fator de espaçamento (σ) determinados pelas equações (4.2) e (4.3):

$$\frac{1}{\tau} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n} \quad (4.2)$$

$$\sigma = \frac{R_{n+1} - R_n}{2l_{n+1}} \quad (4.3)$$

Onde l_n é o comprimento do elemento n , o termo d_n é o espaçamento entre o elemento n e o $(n+1)$ e finalmente R_n a distância entre o vértice virtual da estrutura e o elemento. O elemento mais comprido do arranjo é aproximadamente a metade do comprimento de onda da frequência mais baixa de operação da antena.

Antena é alimentada com uma fonte de RF na parte onde está localizado o elemento da maior frequência. Além dos elementos físicos serem proporcionais, a antena é uniformemente espaçada em relação ao ângulo tangencial formado pelas bordas dos dipolos e o vértice virtual (Figura 4.2). O ângulo (α) pode ser calculado usando o fator de escala e espaçamento mediante a seguinte expressão:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] \quad (4.4)$$

Na frequência mais baixa o elemento mais comprido encontra-se ativo, na medida em que a frequência aumenta, a região ativa se desloca para o elemento menor. Isto acontece por enquanto o elemento é aproximadamente da metade do comprimento de onda do sinal de entrada (ressonância). O fator de espaçamento e o fator de escala são relacionados em [15]-[16] onde estão resumidos os estudos realizados por D.E Isabell e R.L Carrel pioneiros no estudo da LPDA.

O número de elementos N da antena pode ser obtido mediante:

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)} \quad (4.5)$$

Tal que,

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot \alpha, \quad B_s = B * B_{ar} \quad \text{e} \quad B = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}$$

Onde:

B_{ar} = Largura de banda da região ativa

B_s = Largura de banda do projeto

B = Largura de banda desejada (5:1)

De outro lado o VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) está dado por:

$$VSWR = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (4.6)$$

Onde, ρ é o coeficiente de reflexão dado por,

$$\rho = \frac{Z_o - Z_a}{Z_o + Z_a} \quad (4.7)$$

Z_o = impedância característica antena

Z_{in} = impedância da linha de transmissão

Para definir o espaçamento (S) entre cada um dos elementos que conformam a linha de transmissão como se indica na figura 4.3, é preciso determinar a impedância de entrada requerida (Z_o), assim como a impedância característica média dos elementos (Z_{av}) que pode ser obtida pela seguinte expressão, onde t_n é o diâmetro do elemento n [15],

$$Z_{av} = 120 \left[\ln\left(\frac{l_n}{t_n}\right) - 2,25 \right] \quad (4.8)$$

A relação entre a impedância característica da antena e a impedância característica dos dipolos (Z_0/R_{in} vrs Z_{av}/R_{in} onde R_{in} é a parte real de Z_{in}) é caracterizada no trabalho desenvolvido por R.L Carrel [15], indicando deferentes estados que dependem do espaçamento relativo s' (4.9),

$$s' = \frac{\sigma}{\sqrt{\tau}} \quad (4.9)$$

Desta maneira, o espaçamento entre cada centro da linha que alimenta os elementos da antena está dado por:

$$S = w * \cosh\left(\frac{Z_0}{120}\right) \quad (4.10)$$

Onde w é o diâmetro da linha de alimentação ou largura dos canos que conformam a estrutura como é ilustrado na figura 4.3

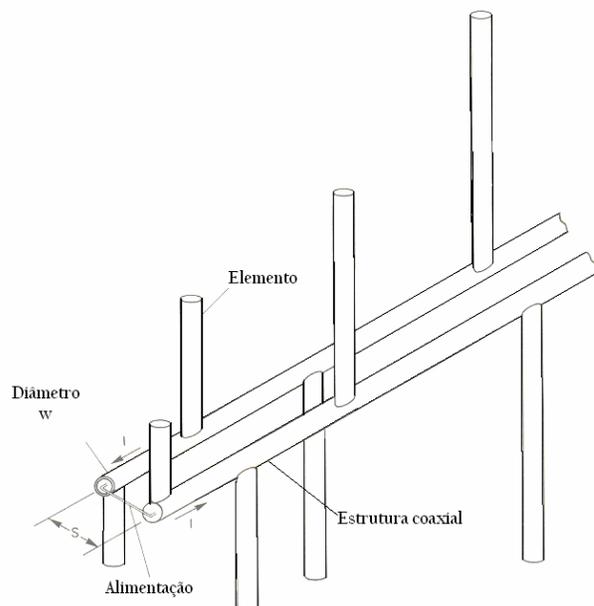


Figura 4.3-Disposição dos elementos físicos da LPDA com estrutura coaxial.

Normalmente os fios não são construídos do diâmetro inicialmente projetado devido à dificuldade em achar diâmetros comerciais conforme os projetados. Os fios podem ser do mesmo diâmetro e o ganho não afeta significativamente. O ganho aumenta em 0,2dB para o dobro do diâmetro dos fios, mas o ganho é afetado pela impedância apresentada pelo alimentador e tende a diminuir se a impedância aumenta por cima dos 1000 [16].

A tabela 4.1 relaciona valores e dimensionamentos de diferentes antenas LPDA em função do ganho. Na tabela 4.2 estão os valores da antena LPDA básica projetada com um $\tau=0,84$ e o $\sigma = 0,14$, onde o ganho segundo [15] é de aproximadamente 8,5dB e segundo [16] é de 7dB. A tabela 4.3 contém os valores da linha de transmissão.

Tabela 4.1-Valores de diferentes antenas em função do ganho.

Ganho	7,5dB	8 dB	8,5dB	9 dB	9,5 dB	10 Db
Ângulo	24,77	21,40	16,84	12,13	9,402	7,12
(t)	0,76	0,782	0,822	0,865	0,892	0,916
(d)	0,13	0,139	0,147	0,157	0,163	0,168
Bar	2,06	2,03	1,90	1,75	1,64	1,53
B	5	5	5	5	5	5
Bs	10,30	10,16	9,52	8,76	8,21	7,67
elementos	10	11	13	16	20	25

O valor de 50Ω de R_{in} é escolhido para que o casamento entre a linha de transmissão e a antena apresente o VSWR menor possível. Com estas condições, o espaçamento entre estruturas é de aproximadamente 4 mm; porém, os valores da impedância média varia em função do comprimento e diâmetro dos fios. Esta característica física é acertada variando o espaçamento entre cada estrutura durante a calibração da antena.

Tabela 4.2-Elementos da antena LPDA Básica ($\tau=0,84$ e $\sigma = 0,14$).

Elemento	L (cm)	D (cm)	Diâmetro (mm)	Raios comerciais (Polegadas)
1	75	22,2	16	5/8
2	63	18,65	13,44	5/8
3	52,92	15,66	11,29	5/8
4	44,45	13,16	9,48	5/8
5	37,34	11,05	7,97	1/2
6	31,37	9,28	6,69	1/2
7	26,35	7,80	5,62	1/2
8	22,13	6,55	4,72	3/8
9	18,59	5,50	3,97	3/8
10	15,62	4,62	3,33	3/8
11	13,12	3,88	2,80	3/8
12	11,02		2,35	1/4

Tabela 4.3-Valores Principais da linha de transmissão da LPDA básica.

Rin	50 Ω	Zo	65
d'	0,15	D	2,5 cm
Zo/Rin	1,3	S	2,83 cm

4.3 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Foram empregados dois códigos comerciais para estimar a resposta da LPDA projetada. O primeiro é o High Frequency Structure Simulator (HFSS) baseado no método dos Elementos Finitos (FEM) e distribuído pela ANSOFT [18]. O segundo é o Numerical Electrical Code (NEC) baseado no método dos momentos (MoM) de livre distribuição [19].

Com estas ferramentas é possível verificar a resposta em frequência da antena obtendo os seguintes resultados.

- Diagrama de radiação para diferentes Theta (θ) e Phi (ϕ)

- Resposta do VSWR em função da frequência
- Resposta do Ganho em função da frequência.
- Distribuição do campo elétrico.

As simulações foram realizadas em uma máquina com 2Gb de memória RAM e processador Pentium 4 de 1.8GHz, deixando claro que cada um das ferramentas empregadas têm vantagens e desvantagens à hora de realizar as simulações para a análise eletromagnético, algumas dessas características são:

- Empregando o NEC, o tempo de simulação foi mínimo comparado com o empregado pelo HFSS com os mesmos recursos de hardware. Assim, uma simulação para obter o diagrama de radiação de uma antena LPDA, em qualquer frequência demora em torno de 30 segundos no NEC; já no HFSS a mesma simulação tarda mais de 2 horas.
- O HFSS tem a grande vantagem em descrever a geometria exata do projeto da antena, assim como as propriedades dos materiais que a conformam. Tem mais ferramentas frente à análise de campo elétrico, e maior variedade na topologia das fontes.
- O HFSS apresenta grande dificuldade frente a análise das dimensões inerentes ao projeto, para modelos que ultrapassem distâncias de $\lambda / 6$ entre a fonte e o contorno. O esforço computacional é alto e a convergência mínima [20].
- O NEC não tem a resolução 3D do HFSS, mas consegue entregar resultados similares em menos tempo com as mesmas condições iniciais de simulação do HFSS. Outra desvantagem do NEC é a falta de caracterização da geometria exata da antena. O NEC emprega uma representação aproximada por meio de fios e segmentos, onde só é possível indicar o raio e comprimento dos elementos. O NEC também apresenta uma lista limitada de materiais.
- O NEC permite uma maior área de análise espacial (como as dimensões reais da câmara) para a análise de distribuição de campo, sempre que seja respeitada a

relação de comprimento dos segmentos dos fios ($\lambda/6$) [21]. Esta análise é realizada em aproximadamente 3 minutos; situação que no HFSS emprega mais de 6 horas sem resultados satisfatórios.

- Dada a complexidade de operação do HFSS na síntese de antenas, fatores como o delta S (fator que aprimora cada elemento em cada iteração), o número de passos ($0 < \text{steps} < 100$) ou iterações, devem ser incrementados para chegar a uma solução coerente, fato que aumenta o tempo de simulação.

Nas figuras a seguir, são apresentados os diagramas de radiação obtidos com o NEC em 200, 400, 600 e 800MHz. A resposta do VSWR em função da frequência com passos de 20MHz. A distribuição de campo elétrico no plano horizontal $Z=0$ também é apresentada. Estes valores foram obtidos com 400 W de potência e 50Ω de impedância de entrada para um espaço de $4\text{m} \times 5\text{m} \times 3\text{m}$.

Nos resultados obtidos com o HFSS para uma frequência de 200MHz, o máximo ganho em $\theta = 90$ e $\phi = 0$ é de 8.4dB e para 600MHz de 9.7dB. As simulações foram realizadas empregando a opção Lump Port como fonte e 50Ω de entrada. Não é apresentada a resposta em 1 GHz dado que o simulador não convergiu a causa das limitações de análise.

Para poder realizar os gráficos do ganho e do VSWR em função da frequência no HFSS, foi necessário fazer uma varredura de 200MHz a 1000MHz com passos de 50MHz e uma frequência central de 600MHz, um S de 0.02, 20 passos. No HFSS uma única simulação com estas características demorou 23 horas e 37 minutos, no NEC, a mesma simulação demorou 2 minutos 12 segundos.

HFSS precisa de condições de contorno com geometrias esféricas para obter diagramas de irradiação. É necessária a elaboração de uma malha que é aprimorada a cada passo onde são resolvidas as equações diferenciais.

Uma vez realizados os passos anteriores, são estabelecidas fontes de energia, assim como materiais envolventes na área limite de análise.

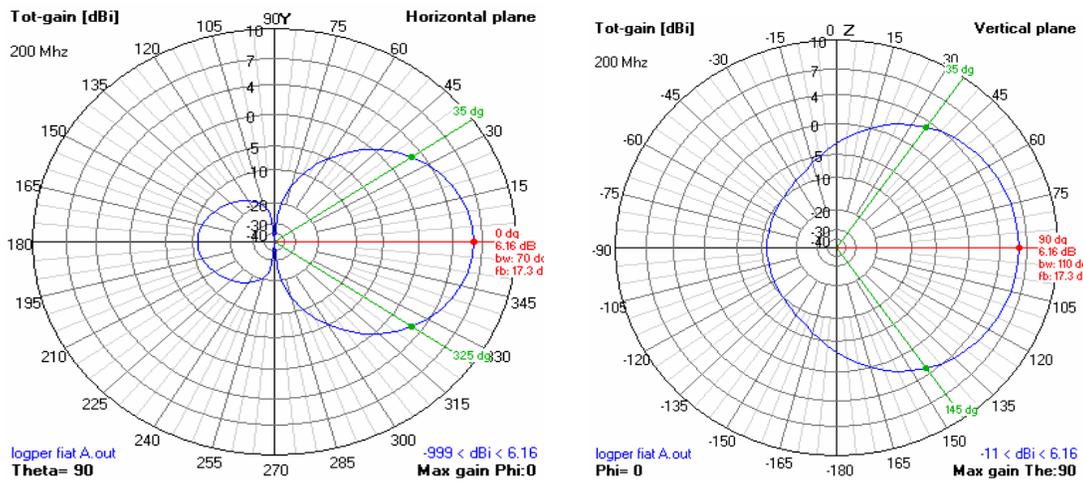


Figura 4.4-Diagrama de radiação para LPDA Básica em 200MHz.

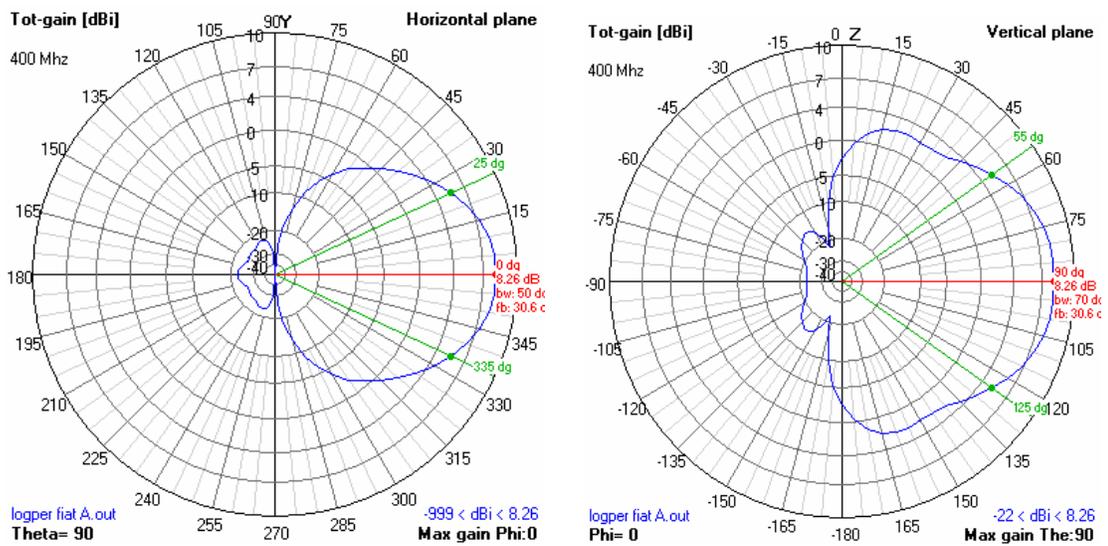


Figura 4.5-Diagrama de radiação para LPDA Básica em 400MHz.

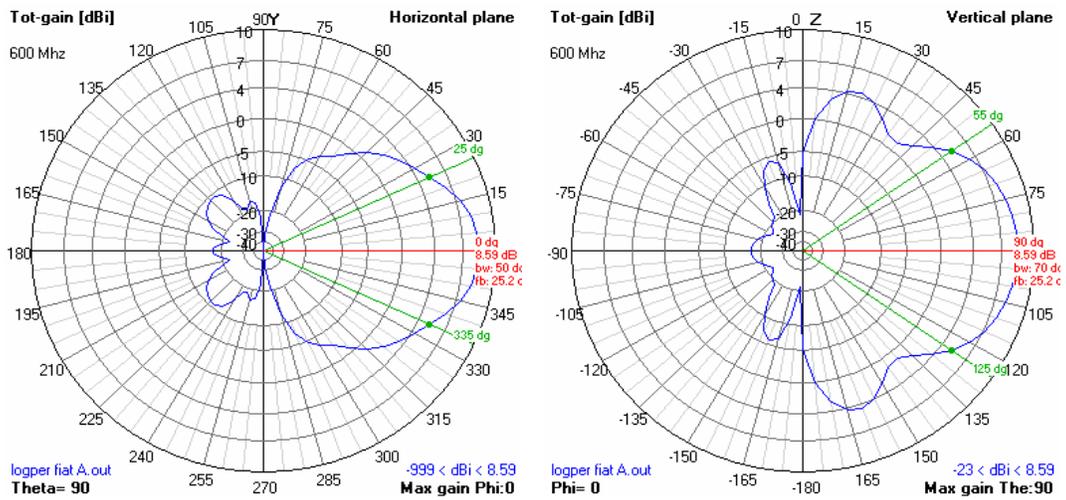


Figura 4.6-Diagrama de radiação para LPDA Básica a 600MHz.

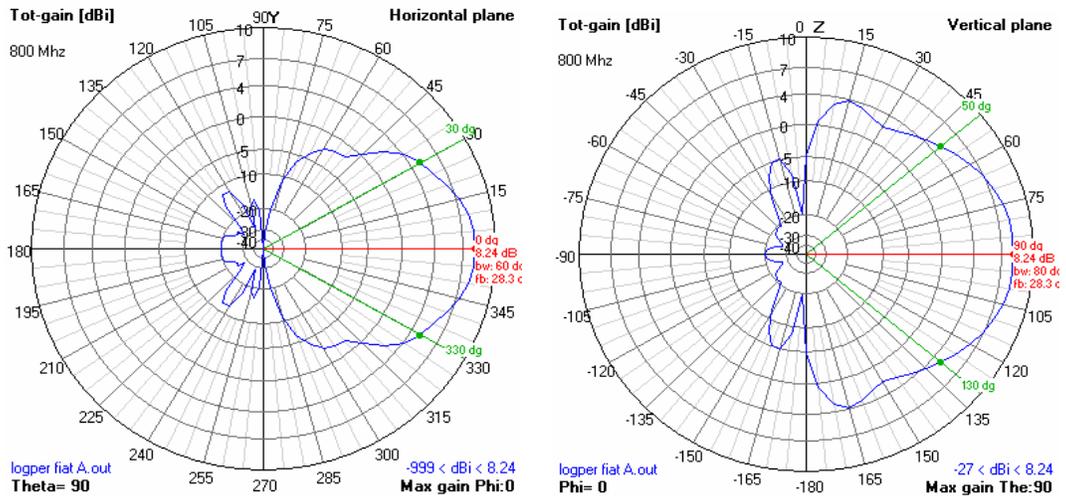


Figura 4.7-Diagrama de radiação para LPDA Básica a 800MHz.

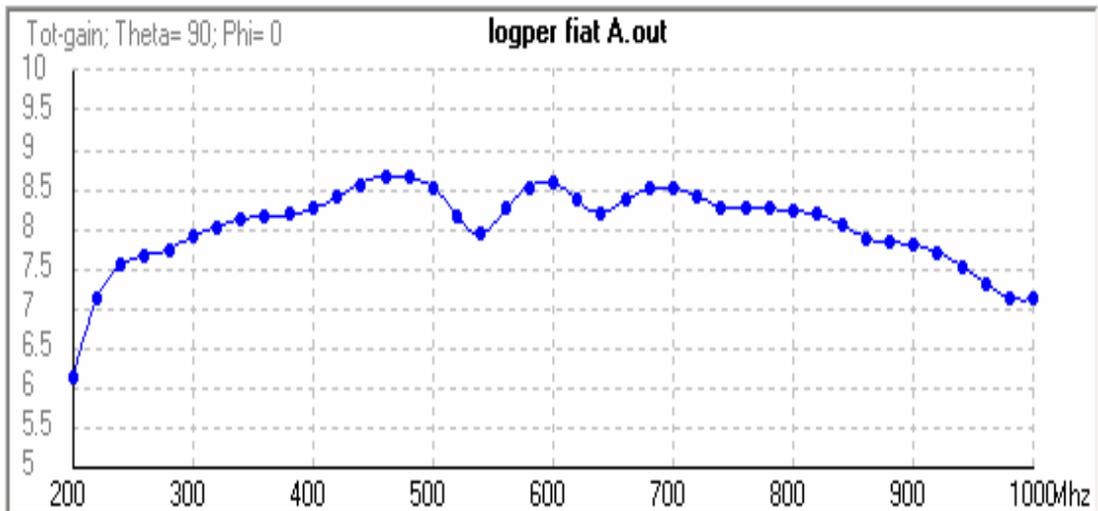


Figura 4.8-Curva do Ganho em função da frequência para antena LPDA Básica (NEC).

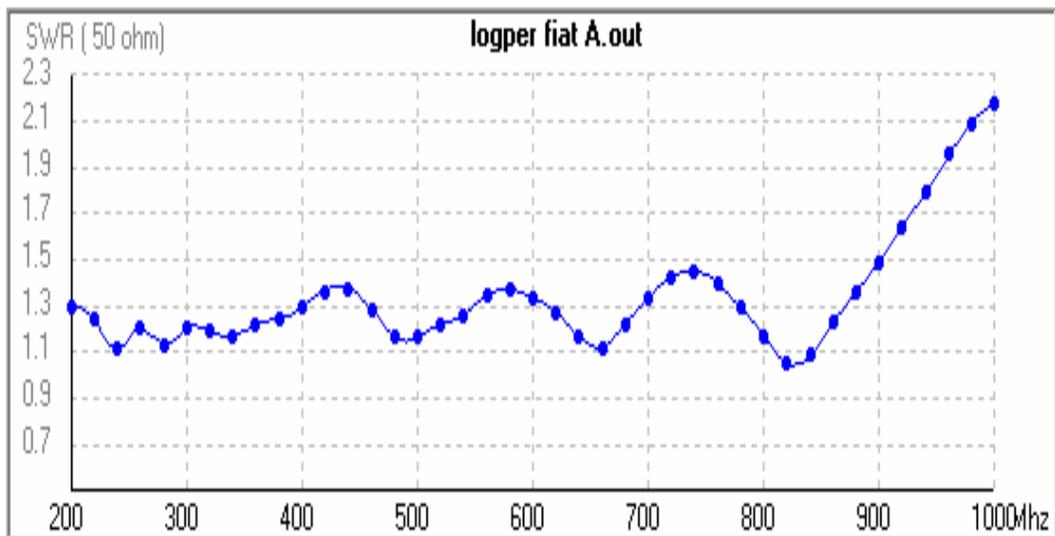


Figura 4.9-Curva do SWR em função da frequência para antena LPDA Básica (NEC).

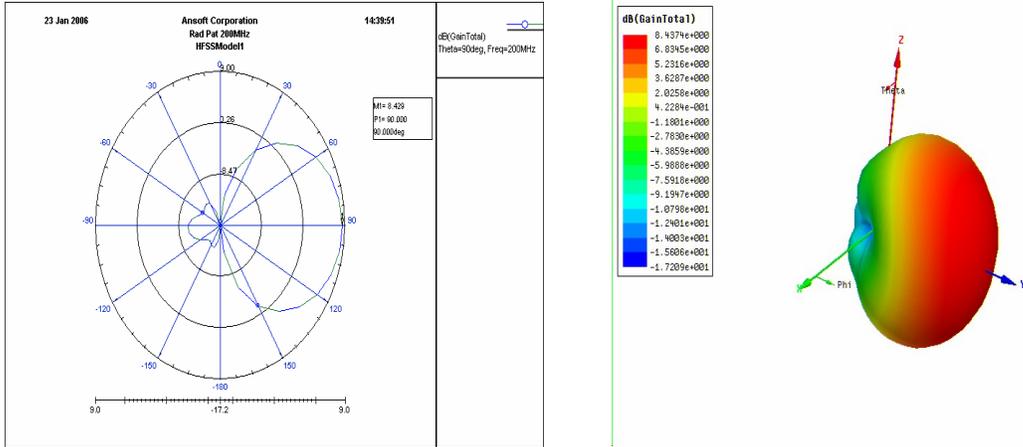


Figura 4.10 Diagramas de radiação LPDA Básica simulada com HFSS em 200 MHz (Plano H e 3D).

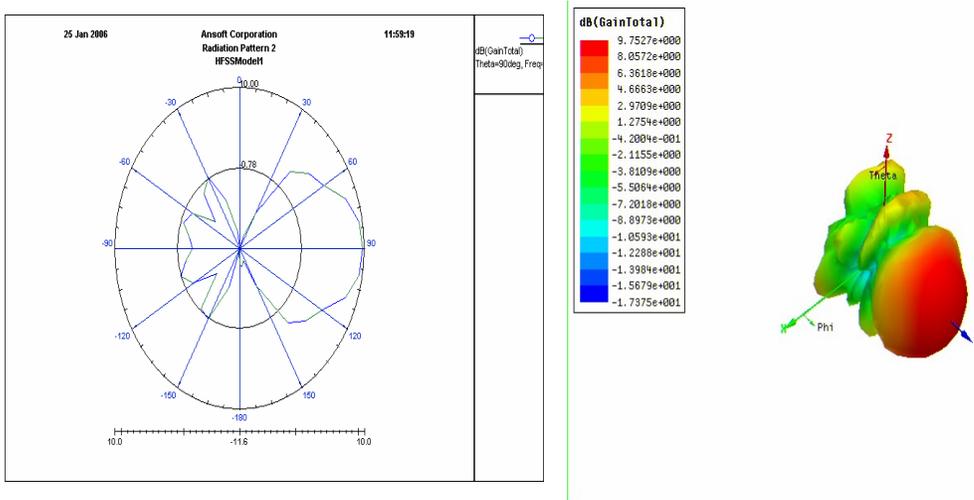


Figura 4.11-Diagramas de radiação LPDA Básica simulada com HFSS em 600 MHz (Plano H e 3D)

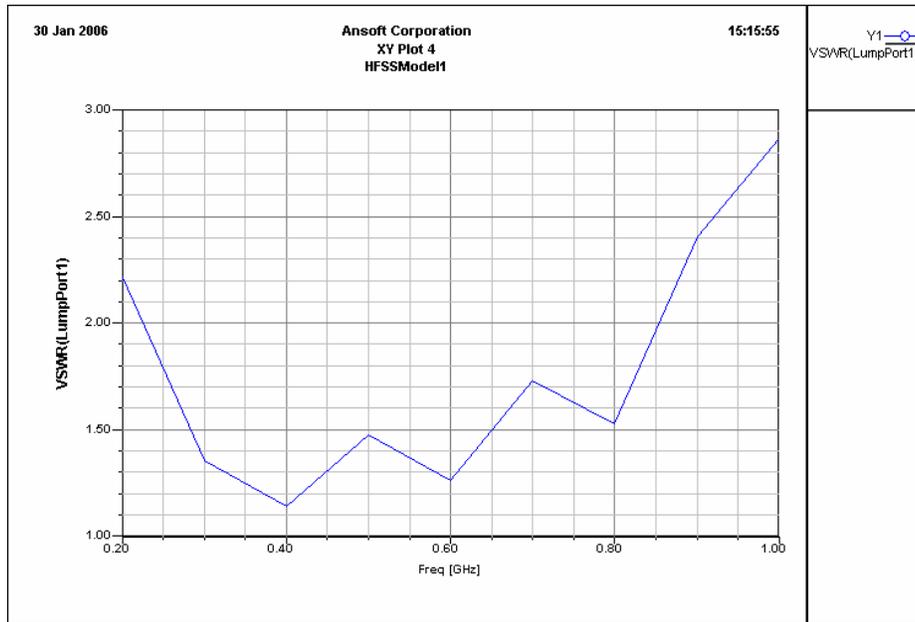


Figura 4.12-Resultado do VSWR em função da frequência simulado em HFSS

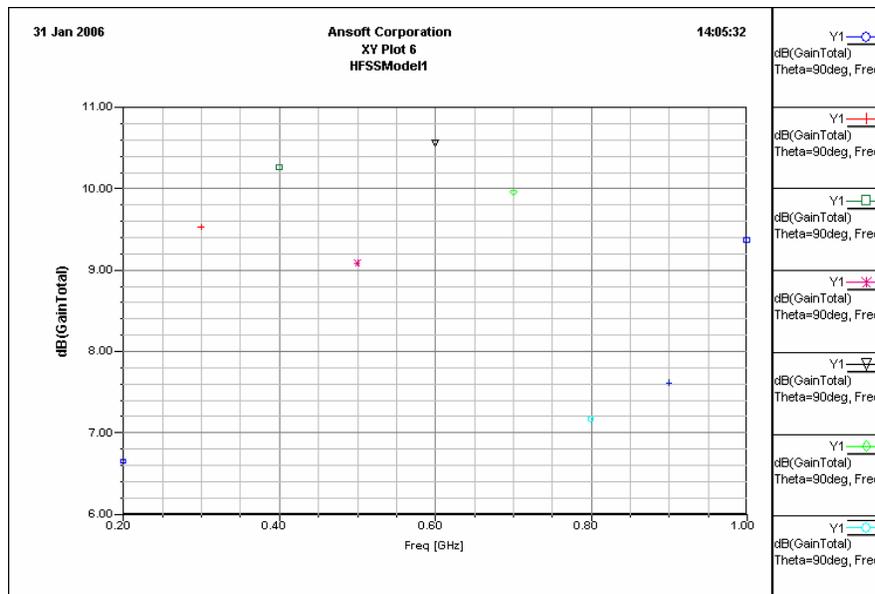


Figura 4.20 Relação do ganho em função da frequência simulado em HFSS.

Baseando-se nos resultados anteriores, o ganho da antena projetada foi maior nas simulações efetuadas com HFSS. A resposta de VSWR foi similar nos dois casos, o valor esteve menor que 1:2 para a maioria das frequências. Apresentam-se valores maiores de VSWR nos resultados obtidos com HFSS principalmente no início e no final da faixa de frequências de trabalho.

Nos resultados é possível conferir que a resposta do ganho da antena LPDA apresenta baixa variação em função da frequência (em média 8dB), comportamento similar ao apresentado pelo VSWR (1:5 em média).

CONCLUSÃO

A antena LPDA é de fato uma das geometrias mais fáceis de projetar e analisar com ferramentas computacionais. Possui as principais características necessárias para realizar testes de IEM e SEM em CSA segundo os requerimentos das normas internacionais.

Para a análise de antenas de fio no espaço livre, ferramentas baseadas no Método dos Momentos como o NEC, têm uma excelente resposta na hora de simular o comportamento real das antenas, oferece grandes vantagens na análise em áreas maiores comparadas com o λ da frequência de teste.

O HFSS baseado no FEM demanda maior quantidade de tempo e infra-estrutura de hardware na análise dos problemas eletromagnéticos, mas permite um maior detalhamento físico da estrutura e análise que o conseguido com o NEC.

5. OTMIZAÇÃO DE ANTENA COM ALGORITMOS GENÉTICOS

O projeto e a otimização de antenas LPDA é discutido amplamente na literatura já que pode ser construída para quase qualquer faixa de frequência usando conceitos simples [22]-[25]. Geralmente, o ganho ou a diretividade desses arranjos incrementa com o valor do fator de escala τ , o que significa aumentar as dimensões da antena como foi apresentado no capítulo anterior.

A diretividade atingida com uma LPDA convencional é moderada, principalmente porque a uma frequência determinada só alguns dipolos encontrasse ativos (região ativa); por outra parte, as equações convencionais falham na hora de ter em consideração os efeitos eletromagnéticos entre fios. Por esta razão é preciso aperfeiçoar a antena básica empregando métodos de otimização baseados na distribuição de correntes e campos eletromagnéticos [23].

Existem diversos métodos de otimização de sistemas e a escolha do método depende das características do problema a ser otimizado. Dentro das ferramentas de otimização os Algoritmos Genéticos (AG) merecem um destaque especial, já que tem se tornado uma importante ferramenta para solução de problemas eletromagnéticos. O aperfeiçoamento da antena foi realizado tendo como condições iniciais as dimensões da antena básica projetada no capítulo anterior, e conferindo novamente a resposta com ajuda de códigos comerciais como o NEC e o HFSS.

5.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos (AG) são diferentes de outros métodos de otimização, já que métodos analíticos como o Hill – Climbing ou o método gradiente computam as derivadas tentando localizar o valor máximo ou mínimo segundo o alvo da função objetivo. Por exemplo, o método do gradiente produz a melhor resposta, mas ela pode se localizar em algum dos extremos e tal vez não seja a ótima [21].

Os AG ao contrário, creiam uma população de maneira randômica de indivíduos chamados de cromossomos, os quais são combinados para convergir em uma solução ou grupo de soluções.

Estas respostas não necessariamente são as melhores, embora apresentem resultados aproximados com os esperados.

Uma das desvantagens dos algoritmos genéticos é a demanda de tempo em fazer o processo de cálculo comparado com os métodos tradicionais. Esta demanda de tempo é atribuída à lógica de funcionamento na que é baseada e também do número da população, assim como do número de gerações que sejam estabelecidas nos parâmetros da análise.

5.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE EM AG

5.2.1 Condições iniciais

Dentro das condições iniciais são consideradas as medidas físicas da antena. No programa são classificadas como variáveis e correspondem a características tais como largura (L_n), separação (D_n) e diâmetro dos fios (T_n), estabelecendo faixas de cálculo para realizar a variação de cada um dos valores.

Dado que os fios das antenas estão representados por pontos em coordenadas cartesianas, as variáveis estão indicadas com valores X, Y, Z correspondentes aos pontos finais ou iniciais de cada fio. As condições iniciais contemplam também a ponderação dos parâmetros de avaliação da antena; que neste caso procuram minimizar o SWR e aumentar o ganho (ponderação de 100%).

5.2.2 Tamanho da população e gerações

O tamanho da população é o parâmetro que determina o número de cromossomos ou projetos individuais da antena incluída em cada população. No presente trabalho são considerados 100 indivíduos para o processo em cada iteração.

O número de gerações indica o número de iterações em que a evolução ou rotina de otimização é interrompida. Durante o processo de evolução em cada geração os valores de avaliação dos indivíduos são diferentes, até finalmente convergir ao redor de uma solução juntando e combinando cada indivíduo. No presente trabalhos empregam-se 100 gerações.

Neste ponto, muitos dos cromossomos com exceção das mutações têm o mesmo desempenho parecendo-se cada vez mais à descendência anterior. Faz parte das condições

de convergência. Neste estudo foi determinada uma porcentagem de 70% de semelhança entre os indivíduos.

5.2.3 Estratégias de Seleção

A seleção dos indivíduos que poderiam proporcionar um desempenho ótimo logo de executada cada iteração é realizada de duas maneiras: *determinística* (mediante o cálculo e comparação dos valores das variáveis ponderadas referentes ao desempenho da antena) e a seleção *probabilística* (também conhecida como seleção estocástica).

Estes dois procedimentos e variações correspondentes são conhecidos como estratégias de seleção, algumas das mais conhecidas são [24]:

- Dizimação (Ranking -Random)
- SSR (Roulet –wheel)
- Proporcional
- Torneio

Neste trabalho será empregado o procedimento SSR. Esta estratégia de seleção é um dos métodos estocásticos mais populares, também conhecido como método da “roleta” ou *Stochastic Sample with Replacement – SSR*.

Cada um dos indivíduos da população representa um índice de aptidão. Assim uma maior proporção numérica é atribuída aos indivíduos com alta aptidão com relação aos demais. A roleta é girada quantas vezes forem necessárias até obter o número requerido de indivíduos que compõem a população e em cada geração, os indivíduos serão trocados por aqueles com melhores qualidades [26].

5.3 OPERADORES GENÉTICOS

A recombinação é feita mediante os processos de cruzamento e mutação. Uma vez feita a seleção, os pais da nova população são estabelecidos para a próxima iteração. O Cruzamento distribui informação entre os cromossomos, combinando as características dos pais para criar um novo filho. É importante esclarecer que o operador de cruzamento não é aplicado para todos os pais (como na natureza, nem todo individuo se reproduz) e é feito mediante uma escolha aleatória conhecida como probabilidade de cruzamento. Esta

probabilidade de cruzamento representa o nível de mistura dos indivíduos da população. Normalmente esta porcentagem está entre os 70 e 100%.

Alguns dos operadores de cruzamento são:

- Aritmética
- BLX (*Blend Crossover*)
- Heurística
- Binária

5.3.1 BLX (Blend Crossover)

Este operador combinatório opera com uma função objetivo que possui o valor das características a otimizar em função dos fatores ponderados. Depois de avaliados cada um dos cromossomos, os melhores permanecem. Seguidamente é escolhida aleatoriamente uma das características da função nos parentes (pai 1 e mãe 1) para ser o ponto de cruzamento (por exemplo o diâmetro do elemento 2).

$$\begin{aligned} \text{Mãe 1} &= [L_{m1} \dots L_{mn} \quad D_{m1} \quad D_{m2} \quad D_{m3} \dots D_{mn-1} R_{m1} \dots R_{mn}] \\ \text{Pai 1} &= [L_{d1} \dots L_{dn} \quad D_{d1} \quad D_{d2} \quad D_{d3} \dots D_{dn-1} R_{d1} \dots R_{dn}] \end{aligned}$$

Logo é selecionado um número aleatório β entre 0 e 1, que define o novo parâmetro pn aleatório que vai determinar as novas características da descendência [23]

$$Pn1 = d_{m2} - \beta * [d_{m2} - d_{d2}]$$

$$Pn2 = d_{m2} + \beta * [d_{m2} - d_{d2}]$$

$$\begin{aligned} \text{Descendência 1} &= [L_{m1} \dots L_{mm} \quad D_{m1} \quad Pn1 \quad D_{m3} \dots D_{mn-1} R_{m1} \dots R_{mn}] \\ \text{Descendência 2} &= [L_{m1} \dots L_{mm} \quad D_{m1} \quad Pn2 \quad D_{m3} \dots D_{mn-1} R_{m1} \dots R_{mn}] \end{aligned}$$

5.3.2 Binário

Também conhecido como Simulated Binary Crossover – SBX é similar ao BLX no sentido em que o filho é criado proporcionalmente aos pais, a diferença está em que a solução com SBX tem filhos mais parecidos com os pais.

Um dos cruzamentos binários mais conhecidos é o de ponto único, neste processo uma localização aleatória no cromossomo dos pais é escolhida, divide o cromossomo em duas partes e cada filho é composto pela combinação de essas partes [24].

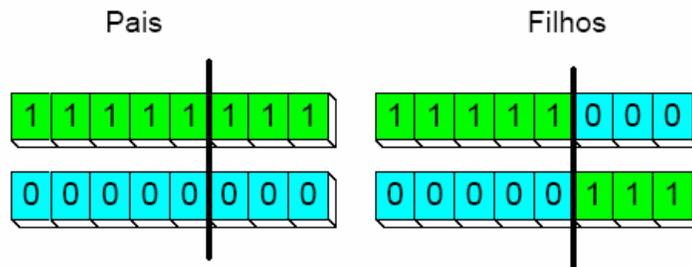


Figura 5.1-Cruzamento Binário de ponto único

Uma variação mais elaborada é o cruzamento de ponto duplo, onde ao invés de selecionar-se um simples ponto de cruzamento são selecionados dois pontos dividindo o cromossomo em 3 partes.

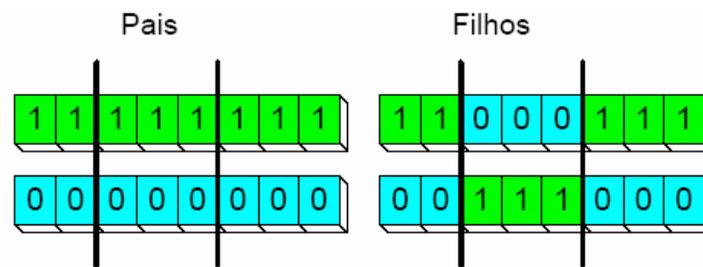


Figura 5.2-Cruzamento Binário de ponto duplo

5.4 OPERADOR DE MUTAÇÃO

O operador de mutação permite a inserção de material genético novo na população. Este processo é controlado por uma probabilidade de mutação que limita a possibilidade de ocorrência. Geralmente esta probabilidade é muito baixa, inferior aos 10% e está presente para que o processo de seleção não se torne puramente aleatório ou proporcional. Existem vários operadores de mutação que normalmente correspondem a distribuições probabilísticas como a uniforme, a gaussiana e não uniforme [26].

No presente estudo foi empregado o operador uniforme. Este tipo de operador de mutação seleciona um valor para uma variável dentro dos limites estabelecidos, logo substitui o número em uma outra variável de maneira aleatória. Para a análise da otimização da

antena, mediante o software de otimização, são contempladas e comparadas as configurações indicadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1-Resumo de operadores de seleção e cruzamento empregados na simulação.

	Operador de seleção	Operador de Cruzamento	Operador de Mutação
Otimização 1	Roulet Wheel	BLX	Uniforme
Otimização 2	Roulet Wehel	Binária 1 ponto	Uniforme

5.5 PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO

O procedimento de otimização começa por gerar uma população de antenas com características similares à inicial, que logo mediante técnicas de escolha, serão os dados de entrada de um operador genético.

O operador genético realizará a união dessas antenas dando como resultado novas antenas “filhos” chamadas de descendência. Esta nova população oferece melhores resultados baseado no desempenho e parâmetros ponderados (ganho e VSWR). Cada geração foi simulada no NEC aproveitando o excelente tempo de análise comparado com o HFSS.

Empregou-se uma ferramenta que interage com o código NEC e que apresenta diferentes tipos de operadores genéticos, de seleção e mutação. Permite também controlar parâmetros de tamanho e semelhança.

Nos diagramas de fluxo das figuras 5.3 e 5.4 apresenta o processo de otimização. Antes de começar a rodar o algoritmo, devem-se escolher as variáveis a serem otimizadas, máximos e mínimos e a ponderação. Escolher uma faixa ampla para o valor das variáveis faz com que o método dos AG tenha uma alta incerteza e escolher uma faixa pequena limita a procura de uma solução interessante.

Cada variável para otimizar é chamado de “Gene”, todos os genes juntos formam um cromossomo. Quando o AG começa, uma população randômica é criada por meio de uma seleção aleatória uniforme do valor do gene (que está entre os limites da variável).

Essa população é um grupo de N cromossomos ou indivíduos, cada indivíduo representa um modelo ou projeto de antena. O AG junta essa população randômica inicial criando assim novas gerações de indivíduos.

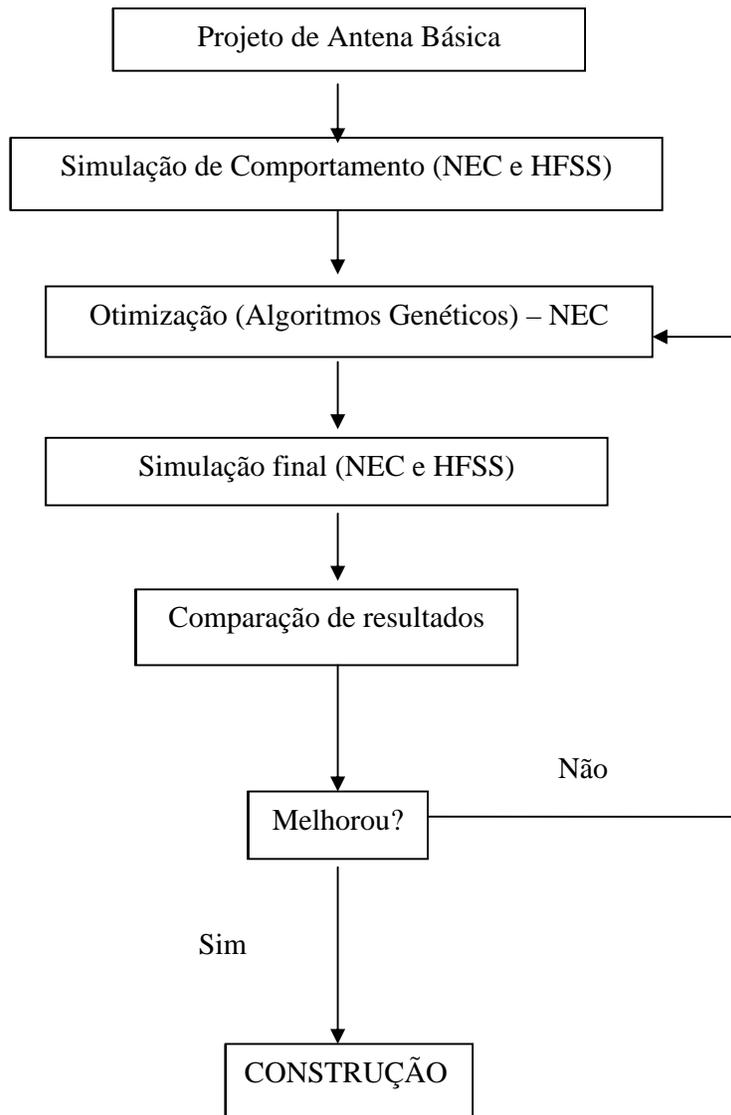


Figura 5.3-Processo de otimização da antena LPDA com AG

O tamanho da população de indivíduos N é constante de geração em geração, mas os indivíduos são modificados geneticamente a cada geração e mudados paulatinamente segundo o desempenho [26].

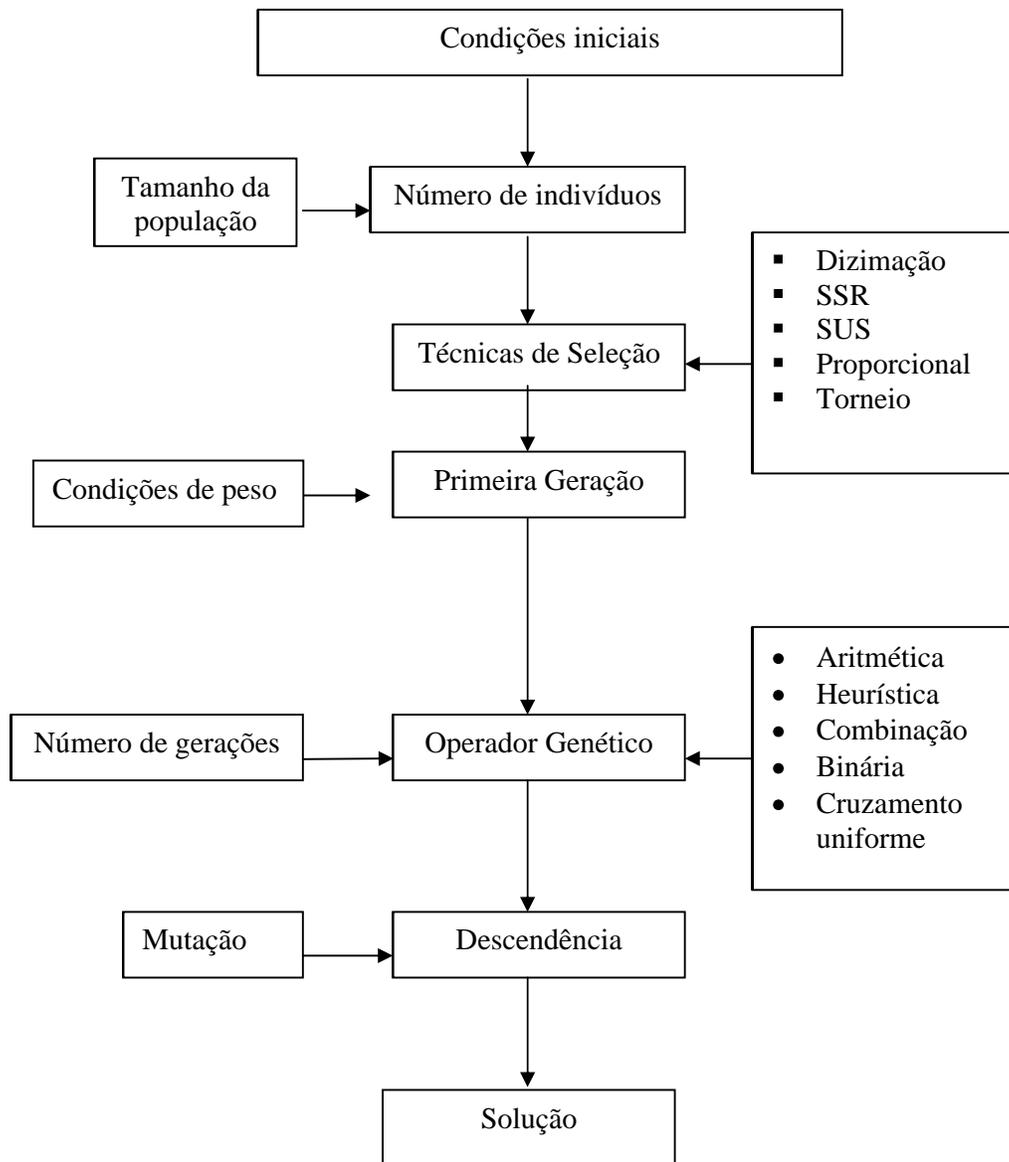


Figura 5.4-Processo de análise com Algoritmos Genéticos.

Uma das maiores características dos AG é capacidade de otimizar a população baseada na medição do melhor (seleção natural). A escolha do melhor está referenciada a uma função objetivo que é desenvolvida pelos dados de entrada a cada geração.

Por causa da natureza estocástica do método, não é possível garantir que vai se projetar uma antena melhor a cada geração, normalmente o método converge obtendo uma pequena população de individuo ótimos.

5.6 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO

Para o processo de otimização foram empregadas as seguintes condições de operação considerando a função objetivo a seguir:

$$F_{obj} = a * [Ganho(dB)] + b * [DPGanho(dB)] + c * [VSWR] + d * [DP(VSWR)] \quad (5.1)$$

- Operador de seleção: Roulet- wheel
- Operador de Cruzamento: Blend – X e binário de ponto único
- Operador de Mutação: Uniforme
- Gerações: 100
- População: 100
- Probabilidade de Cruzamento: 70%
- Probabilidade de Mutação : 4%
- Faixa de frequência: 200 – 1000 MHz
- Passo da frequência: 20 MHz
- Peso do ganho: 100% - Maximo
- Peso do SWR: 100% - MÍNIMO
- a= 1, b=1,c=2,d=1

Empregando a topologia padrão do NEC para síntese de antenas LPDA, é fácil programar a otimização permitindo considerar variáveis de espaçamento (X1, X2), comprimento (Y1, Y2) e raio para cada fio. Em todos os casos Z=0, e isto não compromete elementos que façam parte da linha de transmissão para um total de 60 variáveis. Foram 48 variáveis com valores (X,Y) correspondentes aos fios estabelecendo um espaço de análise $L/2 < L < 2 * L$ e 12 valores $0 < D < 2 * D$ atribuídos aos diâmetros.

Cada uma das simulações durou em torno de 12 horas. A ferramenta permite guardar os 10 melhores indivíduos do processo, que correspondem ao melhor de cada geração. Esta situação permite estudar a pequena população dos melhores, já que algumas geometrias não têm resultados coerentes ou não apresentam soluções possíveis segundo o objetivo.

Assim, as primeiras soluções estão muito perto da antena básica e no caso de Ot1 (otimização feita com o operador Binário) os melhores indivíduos, (gerações 6 e 7) tinham mais do que 1.5m de comprimento fato que não foi registrado na Ot2 (Otimização feita com o operador BLEN-X).

Nos gráficos a seguir são apresentados os resultados do Ganho e VSWR dos melhores indivíduos de cada uma das 10 melhores gerações obtidas mediante o processo de otimização. Percebe-se que cada uma das gerações das antenas, Ot1 e Ot2, tiveram algum grau de otimização com relação à antena básica, embora não fosse para toda a faixa de frequência.

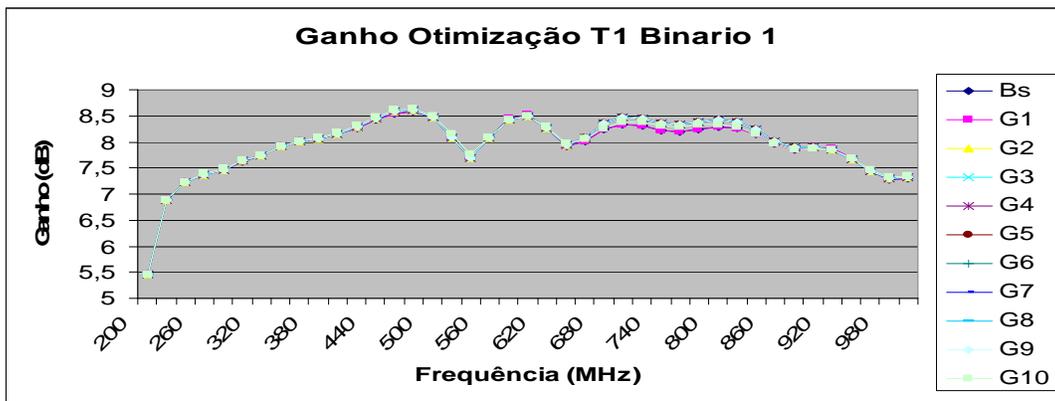


Figura 5.5-Resposta do Ganho em frequência dos melhores indivíduos Ot1.

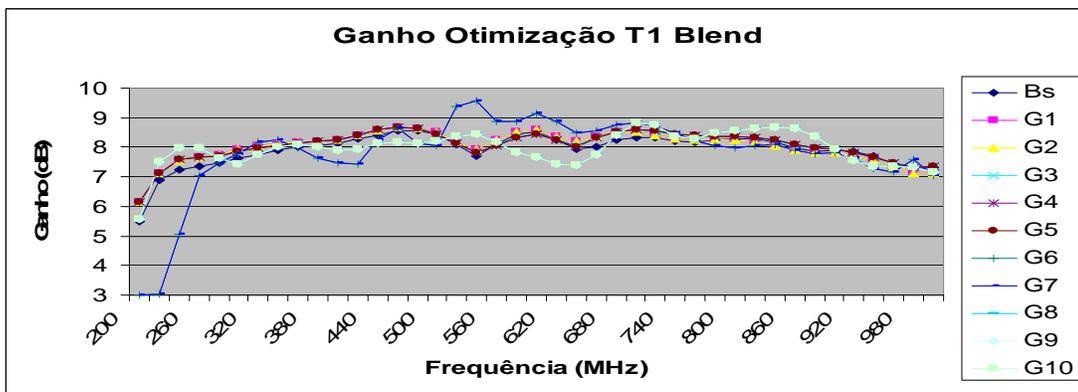


Figura 5.6-Resposta do Ganho em frequência dos melhores indivíduos Ot2.

Na tabela 5.2 estão os valores obtidos nas simulações correspondentes aos processos de otimização comparados com os dados da antena LPDA básica. A otimização 1 (Ot1) corresponde ao resultado baseado no operador binário e a otimização 2 (Ot2) são dados obtidos empregando o operador de cruzamento estocástico.

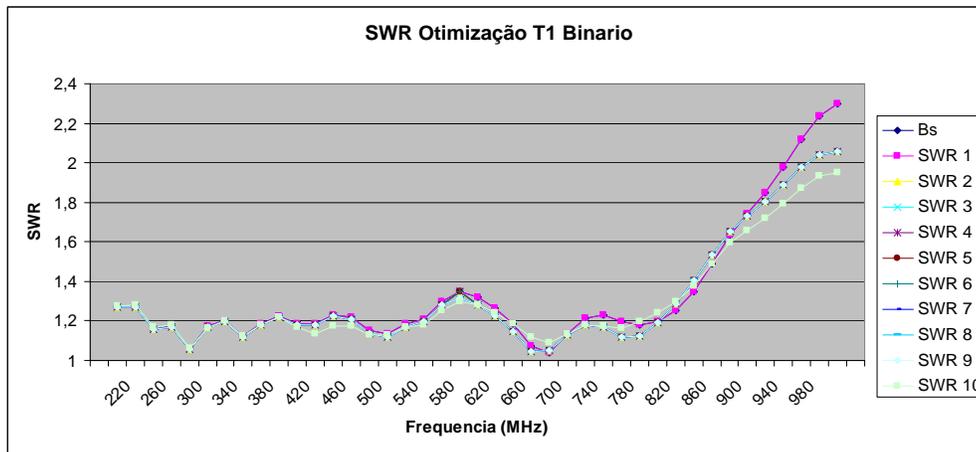


Figura 5.7 Resposta do SWR em frequência dos melhores indivíduos de Ot1.

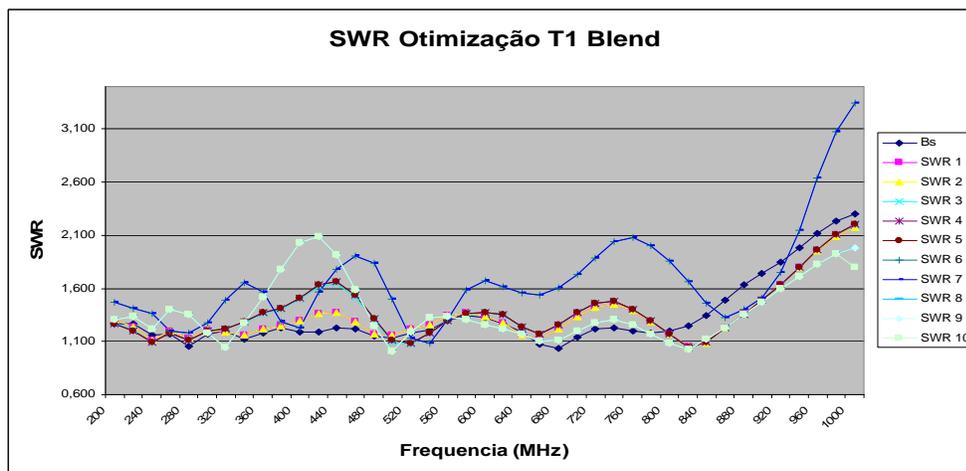


Figura 5.8-Resposta do SWR em frequência dos melhores indivíduos de Ot2.

Como resultado da análise das simulações Ot1 e Ot2, o indivíduo com melhor desempenho foi o número 16 da geração 5 da otimização Ot2. No restante do texto e para efeitos de comparação será chamado de Op1 (Otimização final 1).

Como uma segunda fase de otimização, foi acrescentado um último elemento de diretor com o objetivo de aprimorar a resposta em altas frequências. Deste modo, a antena LPDA Otimizada tem configuração híbrida, melhorando a resposta em ganho sem comprometer significativamente o aumento do VSWR, principalmente nas frequências mais altas.

Tabela 5.2- Características dos melhores indivíduos na otimização Ot1 e Ot2.

Elemento	L (cm)			D (cm)			Radio (mm)		
	Básica	Ot1	Ot2	Básica	Ot1	Ot2	Básica	Ot1	Ot2
1	75,00	75,00	74,00	22,20	22,20	16,00	7	7	9
2	63,00	63,00	64,00	18,65	18,70	13,00	6	6,5	8
3	52,92	52,80	50,20	15,66	15,60	16,00	6	6	8
4	44,45	44,40	42,00	13,16	13,20	13,00	6	6	8
5	37,34	37,40	36,00	11,05	11,00	11,10	5	5	7
6	31,37	31,40	31,60	9,28	9,30	8,90	5	5,25	7
7	26,35	26,40	26,00	7,80	7,80	8,20	5	5	7
8	22,13	22,20	21,00	6,55	6,60	7,40	4	4,37	5
9	18,59	18,60	18,60	5,50	5,50	4,70	4	4,37	5,1
10	15,62	15,60	15,60	4,62	4,70	4,60	4	4,37	5,1
11	13,12	13,20	13,20	3,88	4,50	4,10	3	3,1	5,1
12	11,02	11,00	10,80				3	3	3

Tabela 5.3- Resumo de resultados de Ot1 e Ot2.

Tipo	Operador	Gerações	População	Geração ótima	Indivíduo
Ot1	Binário 1	10	100	10	56
Ot2	Blend	10	100	5	16

Atendendo os objetivos, a antena foi diminuída em 10cm comparada com antena básica conseguindo ainda aumentar o ganho e aprimorar o VSWR. Assim, a antena otimizada híbrida (Op2) tem 13 elementos, 12 ativos e 1 diretor, 1.10 m de comprimento com ganho médio de 8dB com um VSWR teórico menor que 1:2.

Nas figuras a seguir, apresenta-se uma comparação de resultados de ganho e SWR em função da frequência de Op1 e Op2, assim como os diagramas de radiação simulados no NEC frente a resposta da antena LPDA básica.

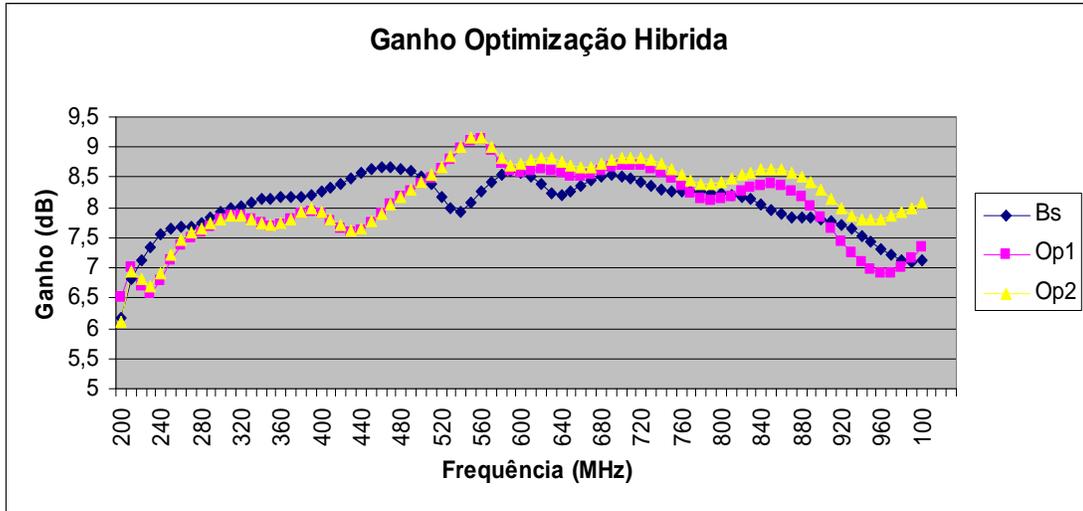


Figura 5.9-Ganho em frequência das antenas Básica, Op1 e Op2.

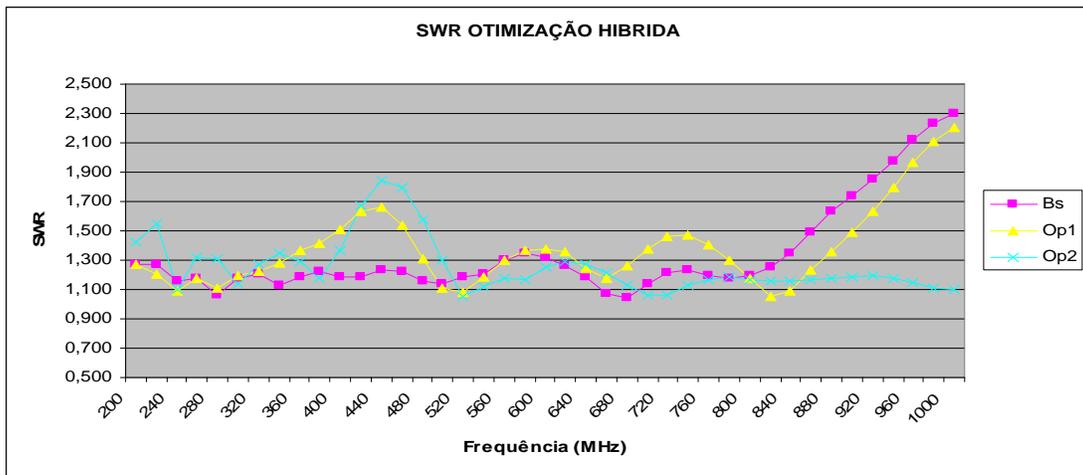


Figura 5.10-SWR em frequência das antenas Básica, Op1 e Op2.

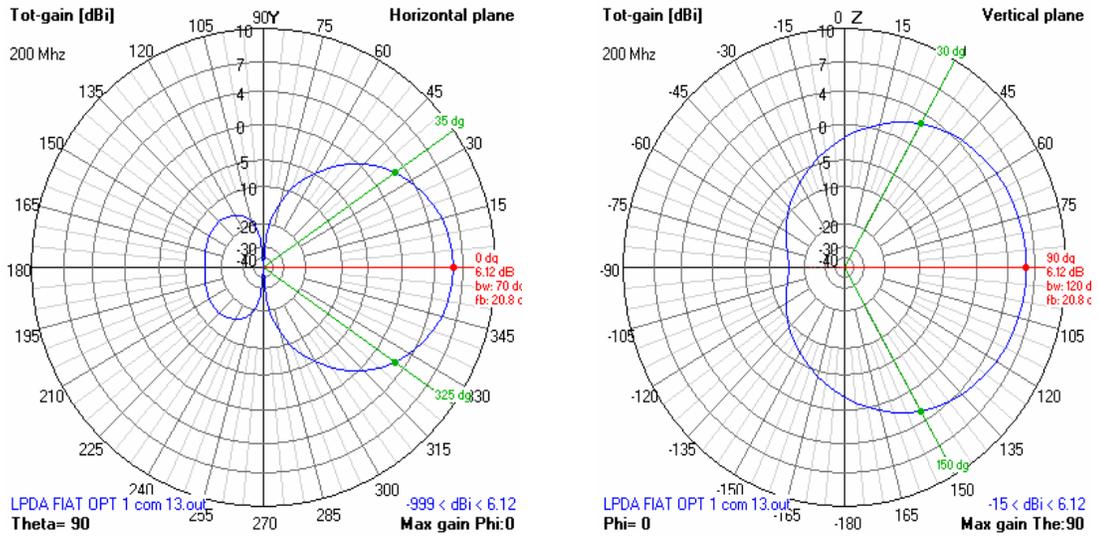


Figura 5.11-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 200MHz.

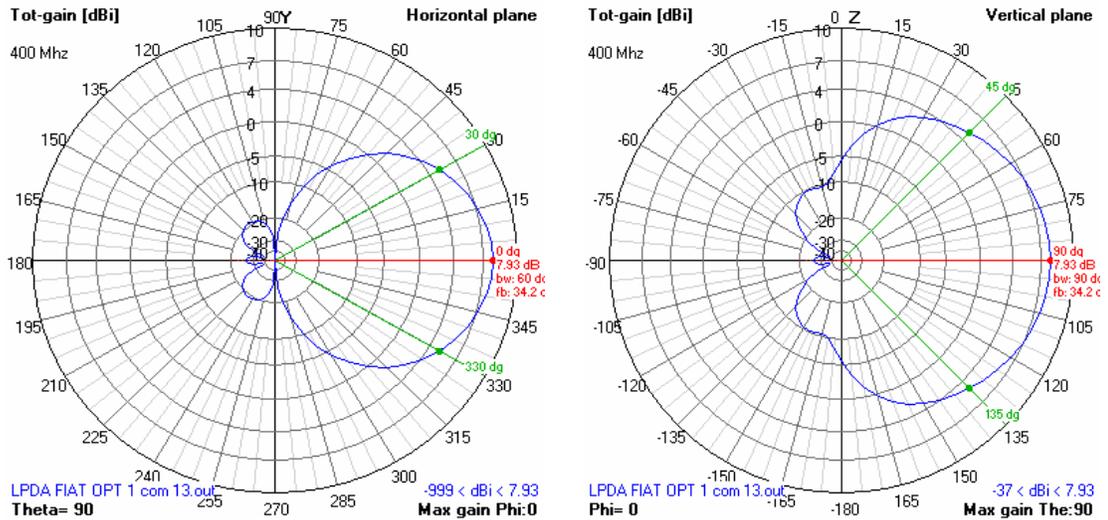


Figura 5.12-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 400MHz.

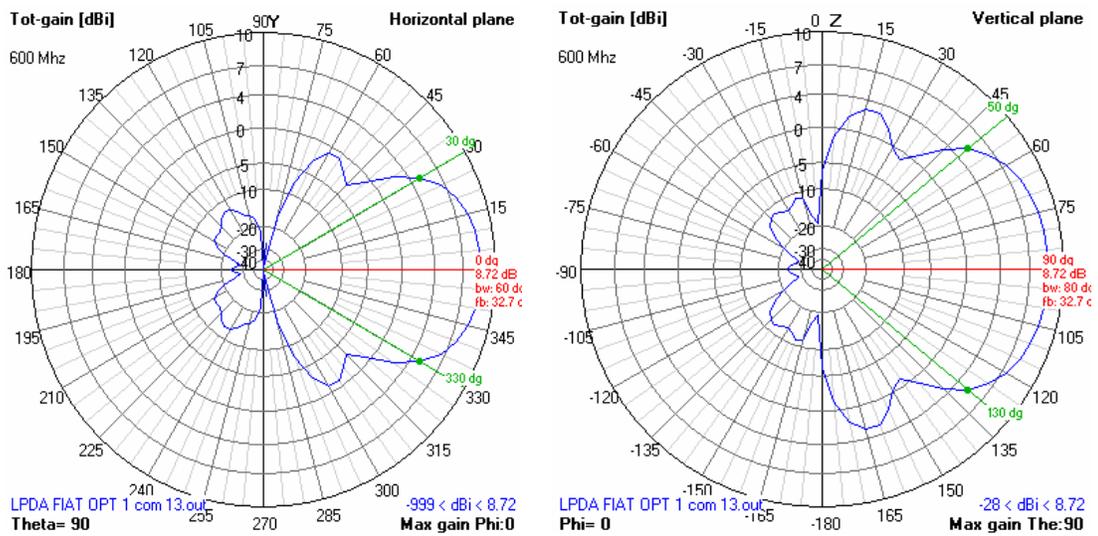


Figura 5.13-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 600MHz.

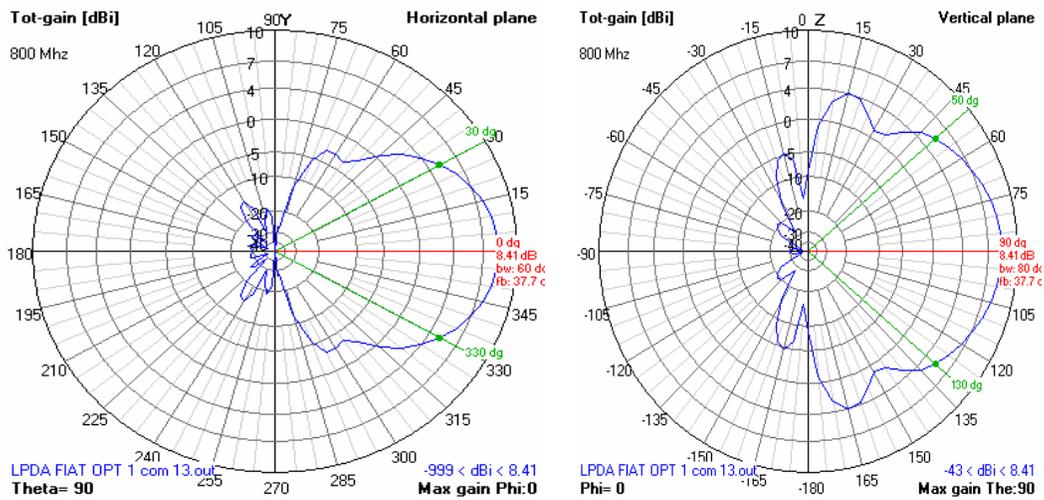


Figura 5.14-Diagrama de radiação para antena LPDA Op2 a 800MHz.

Em comparação, são apresentados os resultados das simulações realizadas em HFSS dos diagramas de radiação da antena Op2 para frequências de 200 e 600MHz. Já nas figuras 5.17 e 5.18, são estão os resultados da simulação da resposta de VSWR e Ganho na faixa de 200 a 1000MHz.

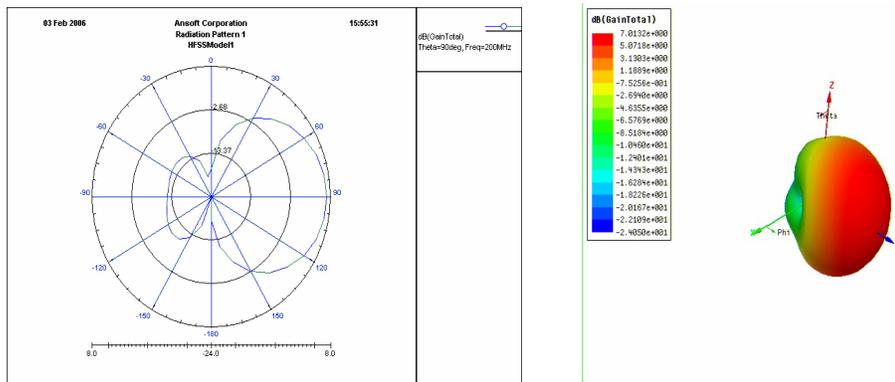


Figura 5.15 Diagrama de radiação obtido com HFSS da antena Op2 em 200 MHz.

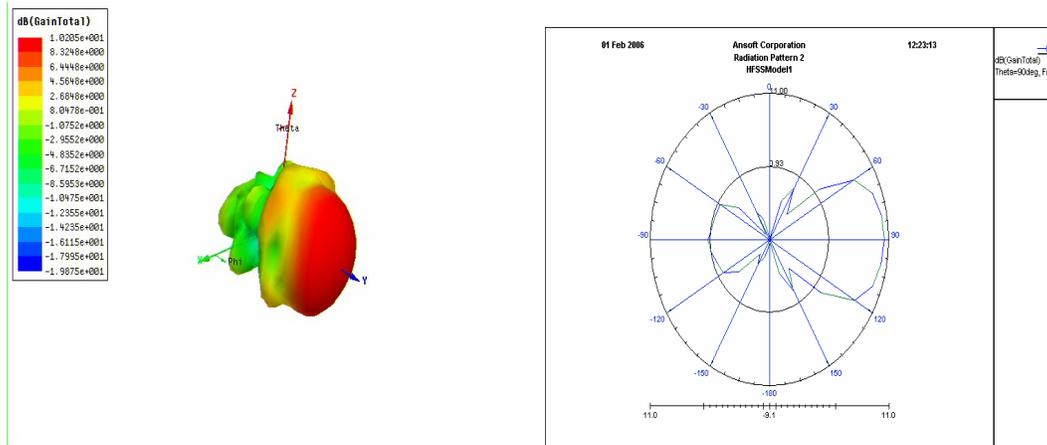


Figura 5.16-Diagrama de radiação obtido com HFSS da antena Op2 em 600MHz.

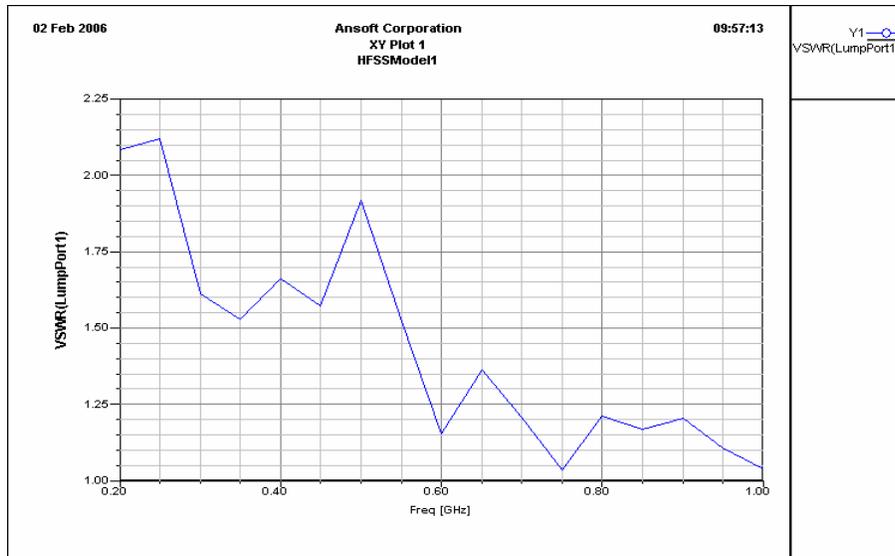


Figura 5.17-Resposta simulada no HFSS do VSWR na frequência da antena Op2.

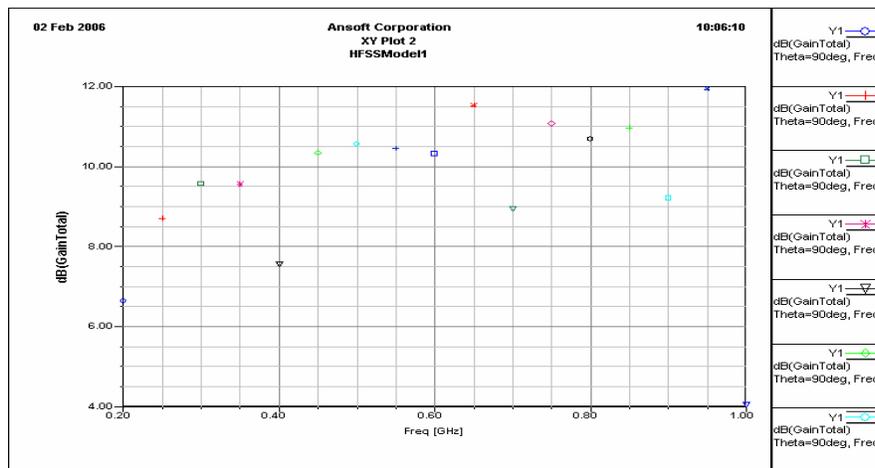


Figura 5.18-Resposta simulada no HFSS do ganho na Frequência da antena Op2.

Novamente os resultados obtidos com cada um dos métodos são similares, apreciando uma resposta melhor referente ao VSWR nas últimas frequências de operação com a antena híbrida. Já o ganho apresenta-se maior nos resultados obtidos com HFSS (em média 9dB).

5.7 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO

Um dos objetivos da análise da antena empregada em testes de CEM em automóveis, é o fato de conhecer a distribuição do campo elétrico no espaço livre, situação próxima à dentro da CA.

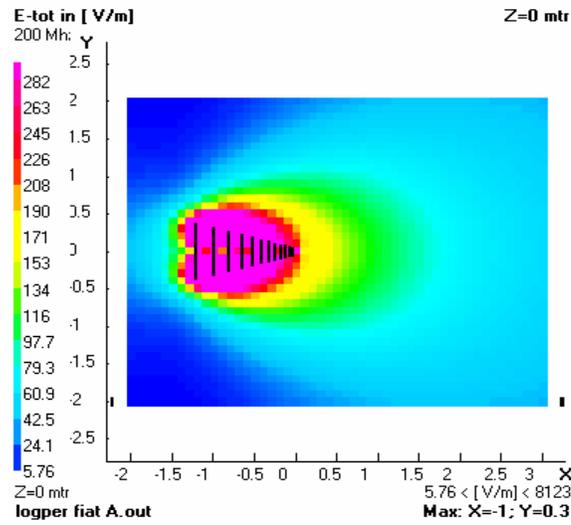
Para a análise de campo e com o intuito de comparar o desempenho das ferramentas, foi simulada inicialmente a antena básica e posteriormente a antena Op2. Os resultados das simulações estão indicadas para o plano $Z=0$, $Y=0$ e $X=2$, entendendo que o ponto final da antena – o elemento 13, está localizado no ponto $(0,0,0)$.

Em todos os casos a antena básica foi simulada com um potência de entrada de 400W e a dois metros (2m) do elemento final como se indica nas normas analisadas. O caso crítico está presente nas frequências menores, já que o centro de fase da antena LPDA (corresponde ao elemento que está em ressonância com a frequência de alimentação) afasta-se do ponto de referência.[27].

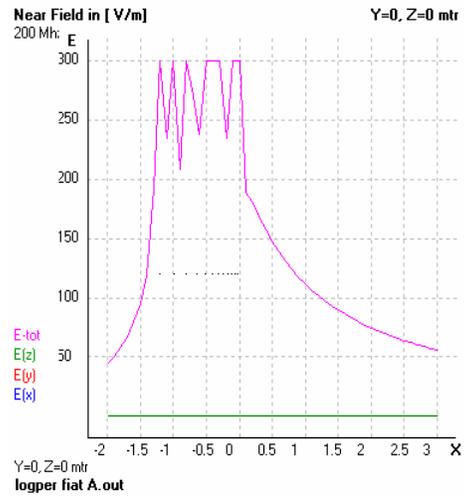
Nesta situação, com 200MHz a intensidade de campo elétrico é menor do que 100 V/m. Para frequências maiores a situação é bem melhor, já que com os mesmos 400W de entrada, a intensidade de campo é superior a 100V/m em $X=2$. Este fenômeno é atribuído a que o centro de fase é transferido para uma posição mais próxima de $X=2$.

No caso da antena híbrida, com a mesma potência de entrada empregada na antena Básica a resposta melhora. Os resultados foram similares aos obtidos com a antena básica (mas com um tamanho menor). Nos seguintes gráficos são apresentadas a respostas para diferentes frequências. Estes resultados foram obtidos com o NEC visto que permite fazer a análise nas dimensões reais da CSA.em aproximadamente 10 minutos.

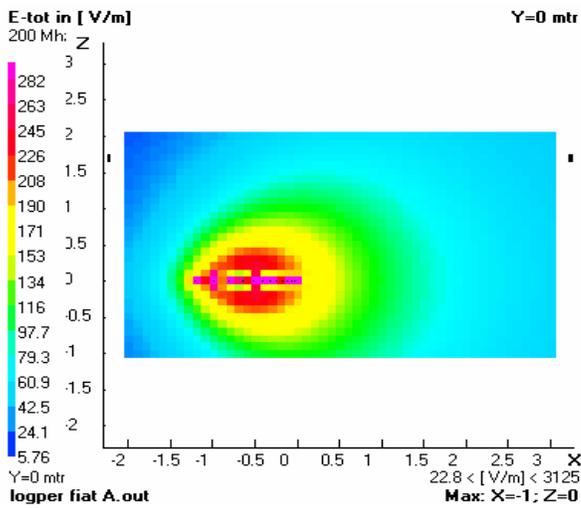
Para cada simulação são incluídas curvas que indicam a intensidade de campo elétrico em função do comprimento do espaço simulado.



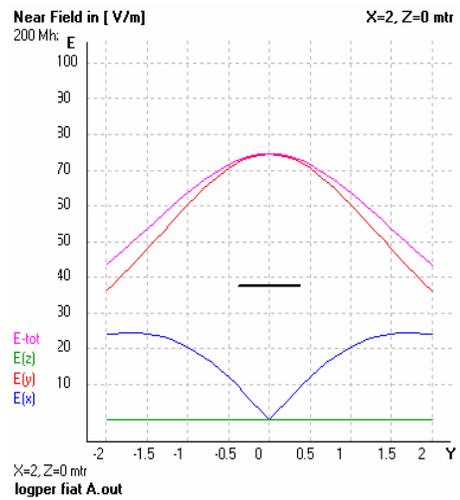
a)



b)

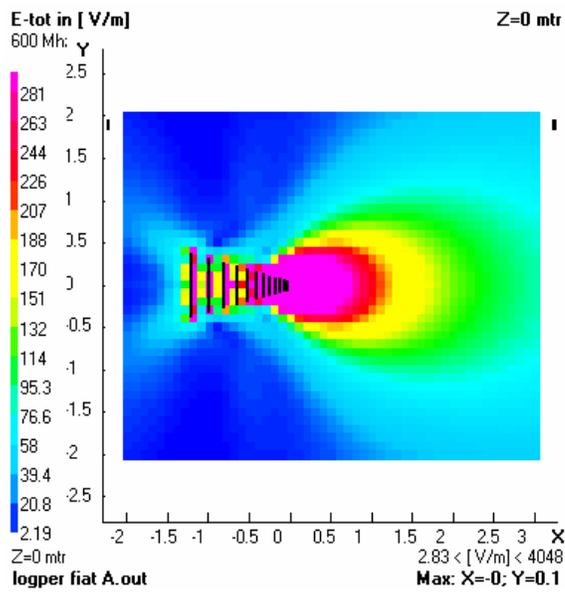


c)

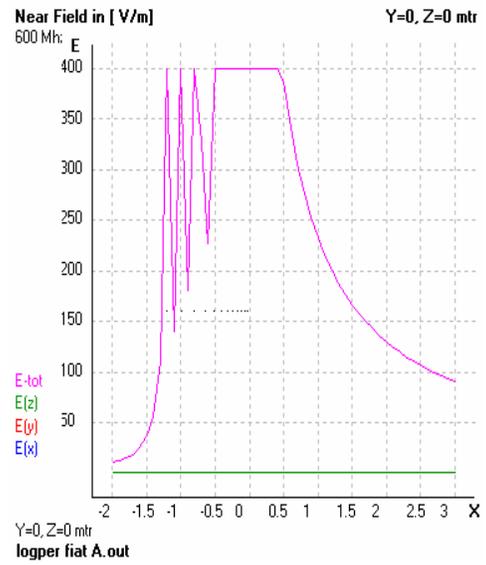


d)

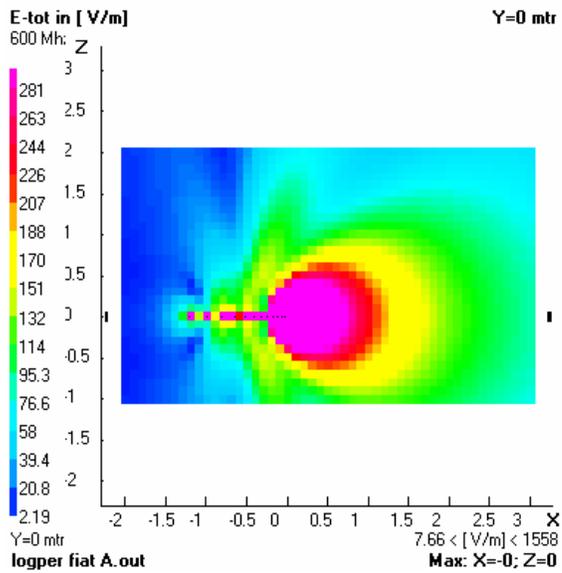
Figura 5.19-Distribuição de campo eletromagnético da antena LPDA Básica em 200MHz.
a) Distribuição no plano Z=0, b) Curva da intensidade no plano Y=0, c) Distribuição no plano Y=0, d) Curva da intensidade no plano X=2



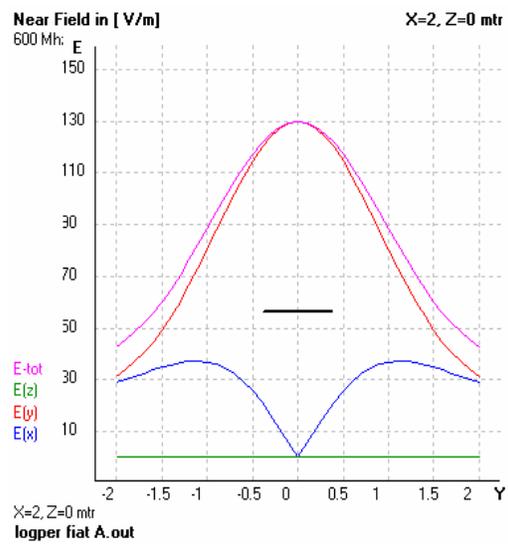
a)



b)

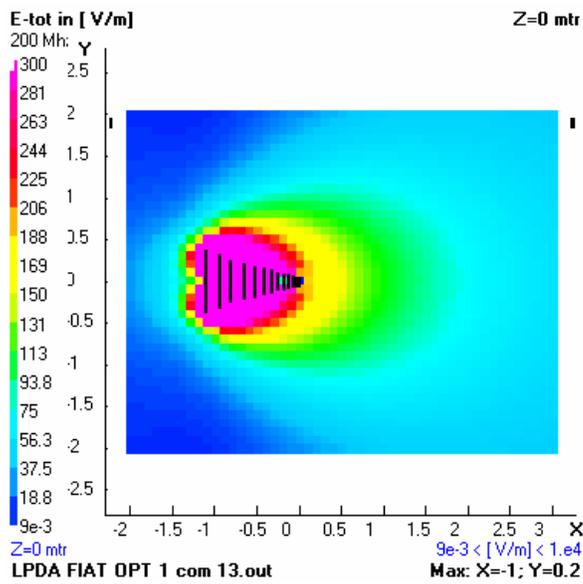


c)

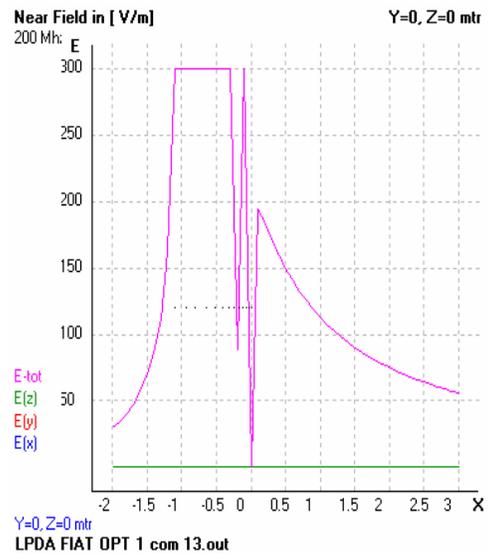


d)

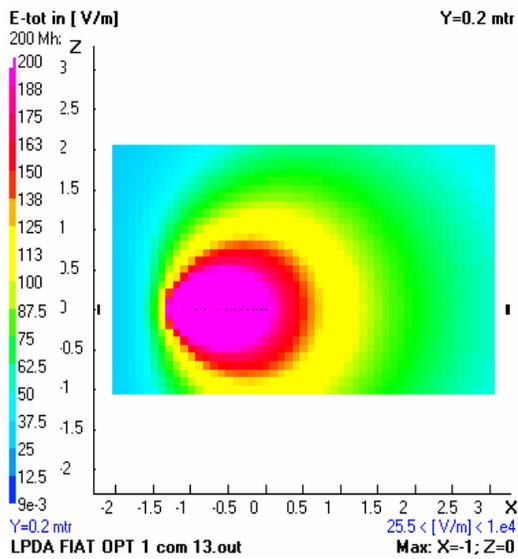
Figura 5.20-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Básica em 600GHz. a) Distribuição no plano Z=0, b) Curva da intensidade no plano Y=0, c) Distribuição no plano Y=0, d) Curva da intensidade no plano X=2



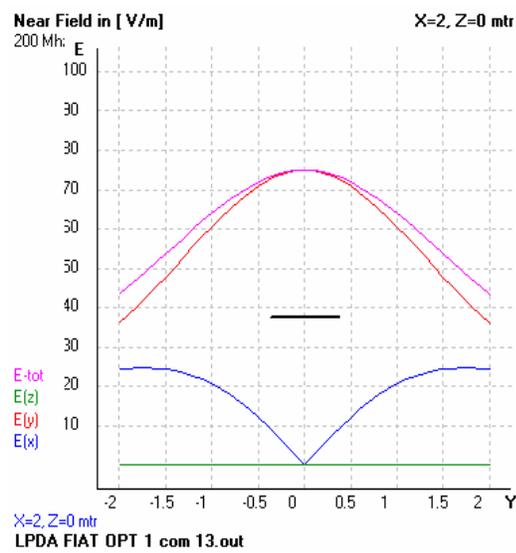
a)



b)

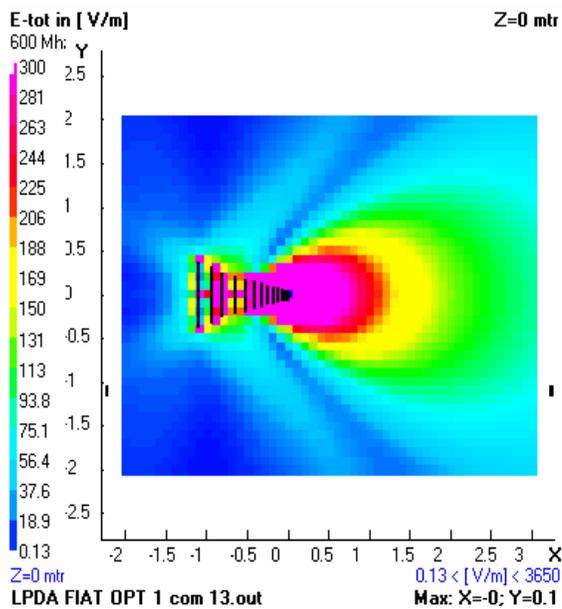


c)

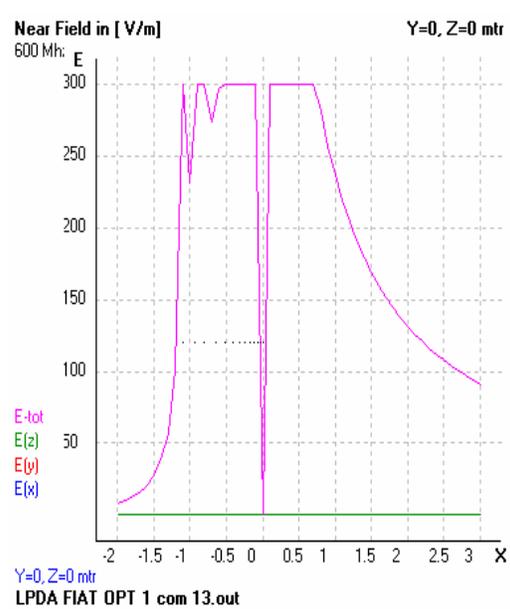


d)

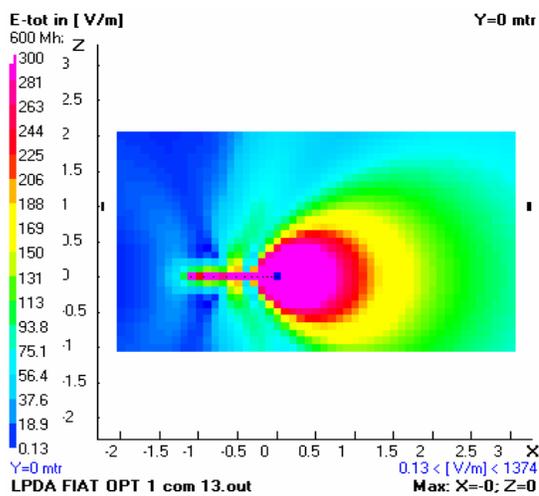
Figura 5.21-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Op2 em 200GHz. a) Distribuição no plano Z=0, b) Curva da intensidade no plano Y=0, c) Distribuição no plano Y=0, d) Curva da intensidade no plano X=2



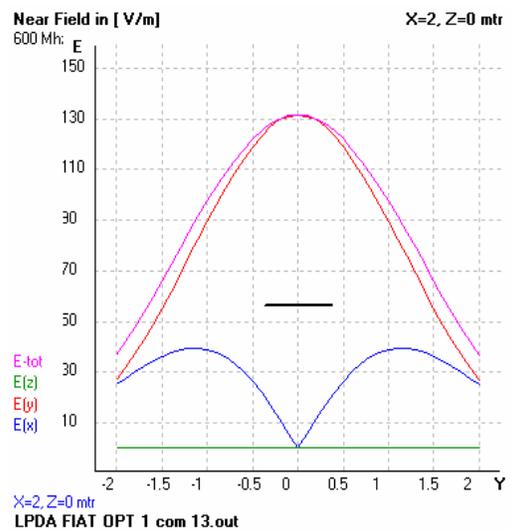
a)



b)



c)



d)

Figura 5.22-Distribuição de campo eletromagnético da LPDA Op2 em 600GHz. a) Distribuição no plano Z=0, b) Curva da intensidade no plano Y=0, c) Distribuição no plano Y=0, d) Curva da intensidade no plano X=2

Novamente e com o objetivo de comparar os resultados das ferramentas de simulação, é apresentada a distribuição de campo elétrico simulada no HFSS para frequências de 200 e 600MHz . Este tipo de simulação por ser para uma única frequência, demora menos tempo que o empregado para fazer a varredura em toda a frequência de operação da antena (5horas).

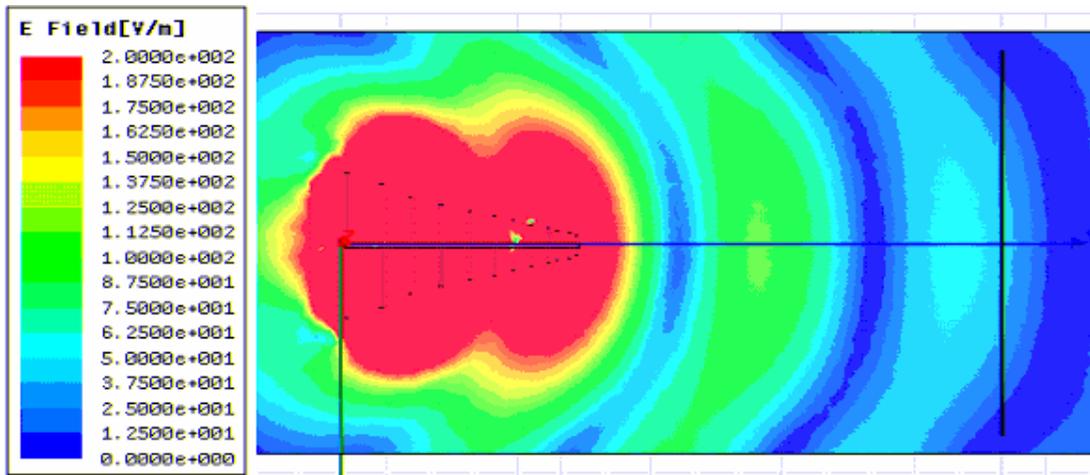


Figura 5.23-Distribuição de campo Antena Ótima Op2 em 200MHz plano Z=0

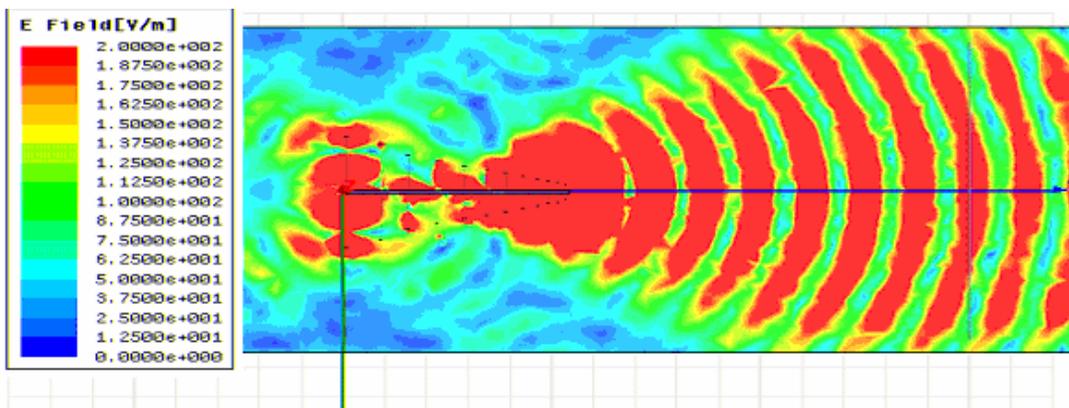


Figura 5.24-Distribuição de campo Antena Ótima Op2 em 600MHz plano Z=0.

Pode-se observar novamente que a concentração de campo elétrico é deslocada conforme o aumento da frequência, concentração que pertence ao centro de fase da antena LPDA. Assim, a intensidade de campo elétrico cresce com o aumento da frequência em condições de espaço livre. Para a análise mais detalhado, os valores no plano X=2 podem ser apreciados nas figuras 5.25 e 5.26.

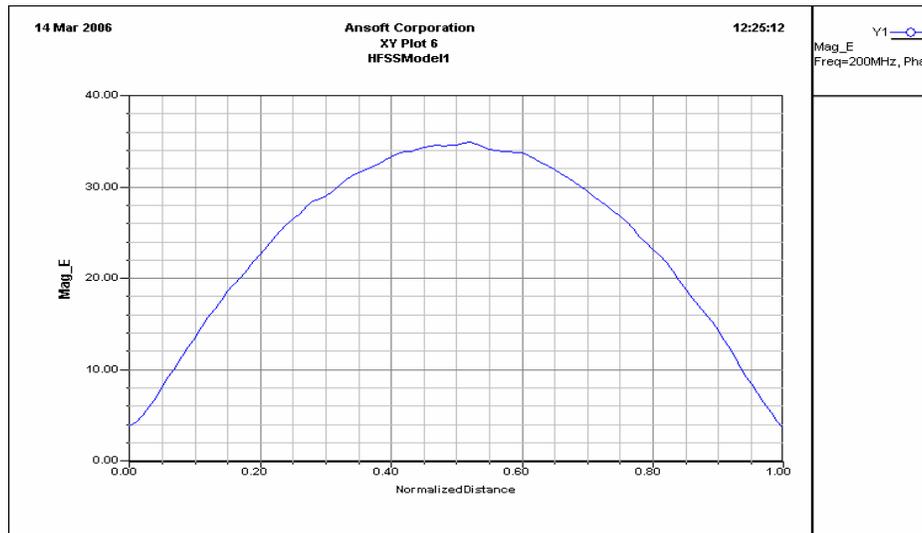


Figura 5.25-Intensidade de campo elétrico para antena Op2 em 200MHz no plano X=2.

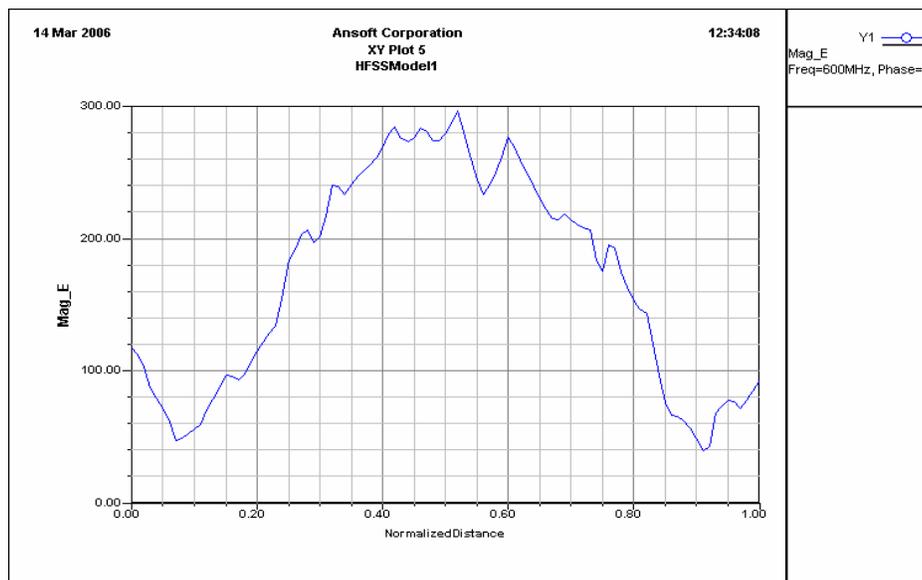


Figura 5.26-Intensidade de campo elétrico para antena Op2 em 600MHz no plano X=2.

O comportamento é similar nas duas ferramentas, em frequências baixas. Para o mesmo ponto em 200MHz o NEC registrou uma intensidade superior a 50 V/m e para o HFSS uma intensidade próxima de 35 V/m; já para uma frequência de 600MHz, a intensidade registrada no NEC foi de 130 V/m enquanto no HFSS obteve-se uma intensidade de quase 300 V/m. Diferença marcada por causa da baixa convergência na solução de projetos em altas frequências com grandes espaços de análise.

CONCLUSÃO

Neste capítulo a teoria dos Algoritmos Genéticos foi empregada para a análise de antenas LPDA. Assim mesmo, uma antena LPDA básica foi otimizada diminuindo suas dimensões, aumentando o ganho e diminuindo o valor do VSWR teórico.

Os resultados obtidos com o NEC são similares aos apresentados com HFSS para baixas frequências. No entanto, em frequências superiores a 600MHz estes resultados são incoerentes comparados com a resposta típica de antenas LPDA nesta faixa de frequências. Esta situação se apresenta já que o software não tem uma boa convergência quando as dimensões do espaço são muito grandes comparadas com o comprimento da onda da frequência de análise.

Simulado no HFSS e no NEC, a distribuição do campo da antena básica e antena ótima Op2 confirmou-se o fenômeno do deslocamento do centro de fase da antena LPDA. Esta condição deixa clara a importância do controle de potência nas LPDA quando implementadas em testes que envolvam radiação de campo elétrico, principalmente na avaliação de SEM em automóveis e equipamentos.

6. MEDIÇÕES E RESULTADOS

Os testes que foram realizados visam analisar o desempenho da antena Op2 construída baseando-se na otimização da antena básica. Posteriormente os resultados são comparados com os obtidos nas simulações prévias à construção, apresentados no capítulo anterior. Os resultados da distribuição de campo elétrico foram comparados com os dados obtidos em experiências realizadas na CSA. Os testes foram realizados com uma antena tipo Corneta [30] e uma LPDA convencional [31], a fim de estabelecer o equipamento mais adequado para a realização de testes de CEM e SEM em automóveis segundo as recomendações internacionais [10] [12].

6.1 PROCEDIMENTO DO TESTE

Um dos procedimentos descritos em [10] está orientado à calibração de antenas e equipamentos para a realização de testes envolvidos na avaliação de IEM e CEM. O teste tem como objetivo estimar o máximo desempenho das antenas empregadas, conforme a capacidade dos equipamentos existentes no laboratório. A idéia é controlar a potência de entrada da antena empregada e atingir um campo homogêneo para toda a faixa de frequências do teste.

6.1.1 Equipamentos do laboratório

Foram empregados vários equipamentos que fizeram possível a realização dos testes de calibração das antenas na CSA do LACE nas instalações da FIAT S.A. Os equipamentos têm como função gerar a potência aplicada na antena assim como realizar as medições e aquisição de dados. Estes equipamentos foram:

- Amplificador RF:
 - Modelo 500W 1000A – 80 a 1000MHz – Fabricante: Amplifier Research
- Sensor de Campo Elétrico Isotrópico
 - (Field Probe) FP5000 – Fabricante: Amplifier Research, 10kHz – 1GHz
- EMI Test Receiver 20 – 1000MHz ESVS 10 Fabricante: Rohde & Schwarz
- Function Generator 10MHz – 20MHz AFG Fabricante: Rohde & Schwarz
- Signal Generator 9kHz – 1,040GHz SMY01 Rohde & Schwarz

- Milivoltmeter URV 5 Rohde & Schwarz
- Field Monitor FM 5004 Amplifier Research

Referente à aquisição de dados, a ponta de prova-*Field Probe* (FP-5000), é peça importante no desenvolvimento das experiências. Este equipamento emprega-se para medição de campo elétrico; neste caso, para níveis de campo na faixa de 1 a 300 V/m, operando em uma banda de RF de 10kHz a 1GHz. Para evitar interferência eletromagnética na transmissão de dados esta ponta de prova transmite sinais via fibra ótica.



Figura 6.1-Ponta de prova para medição de campos eletromagnéticos FP-5000.

Para medir a intensidade de campo, o FP-5000 (figura 6.1), conta com antenas monopolo mutuamente ortogonais, e realiza a somatória vetorial dos valores lidos em cada eixo do plano cartesiano (X, Y, e Z). Este resultado é enviado para o receptor (monitor de campo), onde os dados de cada eixo podem ser visualizados. A ponta de prova dispõe de duas antenas por eixo – uma para altas frequências e outra para baixas frequências. Estes sinais são filtrados, amplificados e combinados para finalmente alimentar um multiplexador.

Dependendo da frequência e do nível estabelecido é atribuído um ganho. Este equipamento dispõe de quatro níveis de intensidade (10, 30, 100 e 300 V/m), cada nível requer um ganho em cada frequência selecionada apresentando oito fatores de amplificação.

Assim quando se seleciona um nível de 100 V/m, o multiplexador direciona o sinal de baixa ou alta frequência do eixo que está sendo testado. O microprocessador atribui o

ganho apropriado para este sinal. Este processo é repetido para a próxima amostra do sinal nos eixos restantes. Um resumo das características técnicas do equipamento encontram-se na tabela 6.1.

Tabela 6.1- Características técnicas do FP-5000

Especificações	Valores
Fluxo de amostra	1 -26 amostras/s
Sensibilidade	1-300V/m
Tempo de reposta	40ms
Resposta em frequência	10K-1GHz
Escalas	10, 30, 100, 300 V/m
Tensão quando totalmente carregada	3,6VDC
Overload withstand	1000 V/m
Range de temperatura de operação	10 a 40 °C

A posição, o suporte e o tamanho da ponta de prova são fatores importantes para o sucesso das medições. Esta deve ficar afastada dos absorvedores e do elemento radiador. Desta forma evitam-se reflexões, regiões ressonantes dentro da câmara anecóica e a ausência do campo TM. O tamanho deve ser pequeno comparado com o comprimento de onda da frequência de teste, assim como se deve evitar ao máximo a presença de estruturas metálicas ou com condutividade alta [32].

6.2 ANTENA TIPO CORNETA

Foi realizado um experimento preliminar com o objetivo de conhecer os elementos de medição, radiação, controle e aquisição de dados existentes no LACE. Neste teste foi empregada uma antena modelo 3106 da ETS-Lindgren tipo corneta – (*Double Ridged Waveguide Horn*) que opera em uma faixa de frequência: 200MHz – 2GHz. Figura 6.2 [30]

Foi medida a intensidade de campo elétrico distribuído na câmara sem a presença do veículo como é indicado em [10]. Durante a prova a potência de saída do amplificador é relativamente constante, função controlada pelo gerador de sinal e o campo medido.

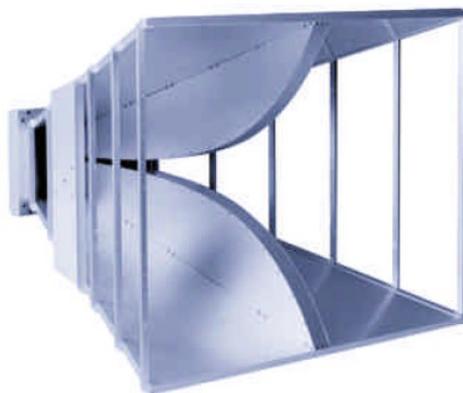


Figura 6.2-Antena tipo corneta (*Double Ridged Waveguide Horn*).

O objetivo principal deste teste é procurar a uniformidade no nível da intensidade de campo elétrico nos dois pontos localizados a 0,75m de cada lado do ponto de referência do carro. O nível de intensidade de campo elétrico este deve estar entre +/- 3dB no mínimo para o 80% dos pontos de prova numa mesma frequência [10].

Nesta situação, o medidor isotrópico deve-se localizar a 1 metro +/- 0,05m acima do solo da estrutura da CSA que simula o ponto de referência do carro. Este ponto depende da geometria do automóvel e encontra-se a +/-20 cm do eixo frontal de simetria do automóvel ou a 1 +/- 0,2 m dentro do carro. A medição deve ser realizada desde o eixo da roda dianteira até o pára-brisas do carro como indica a figura 6.3.[10].

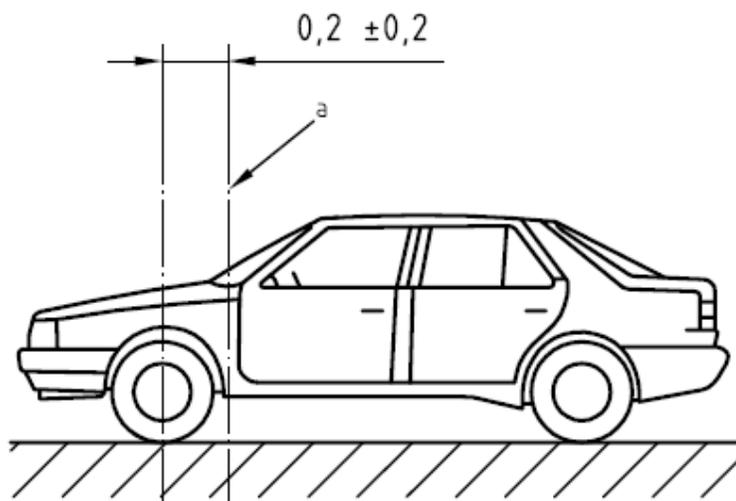


Figura 6.3-Esquema do ponto de referência em automóveis

Nesta primeira experiência foram adquiridas:

- Intensidade de campo elétrico [V/m]
- Potência de entrada na antena [W]
- VSWR
- Nível do gerador [dBm]

A frequência foi variada em passos de 5MHz, mudando a altura da antena de 1 para 1,5m e a polarização (horizontal e vertical) para um total de 36 testes seguindo a configuração indicada nas figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

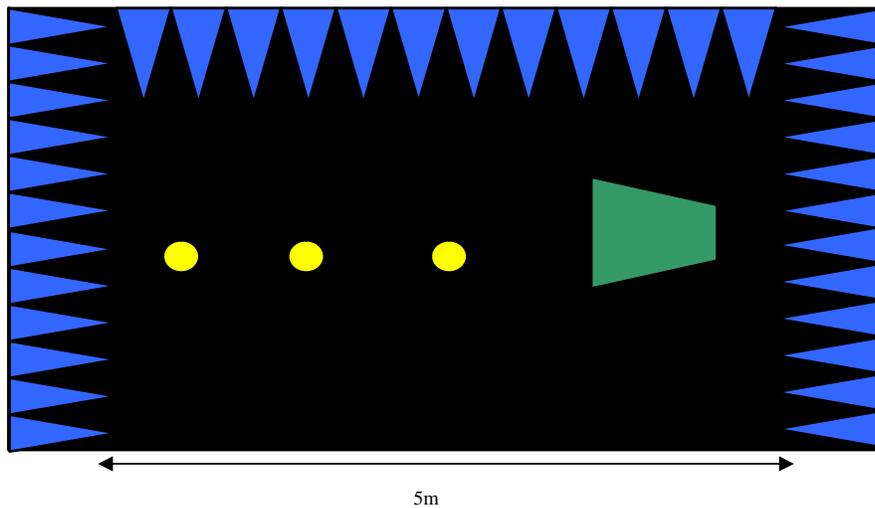


Figura 6.4-Vista lateral experimento 1.

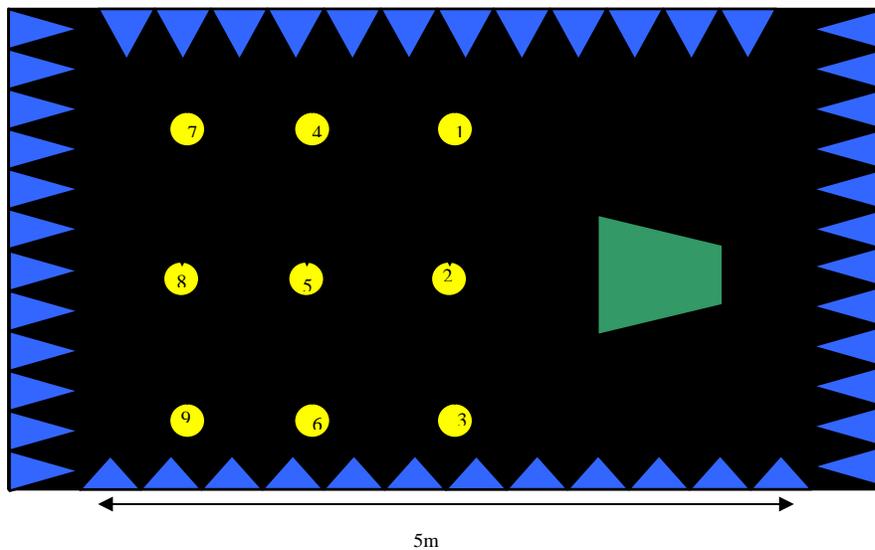


Figura 6.5-Vista superior experimento 1

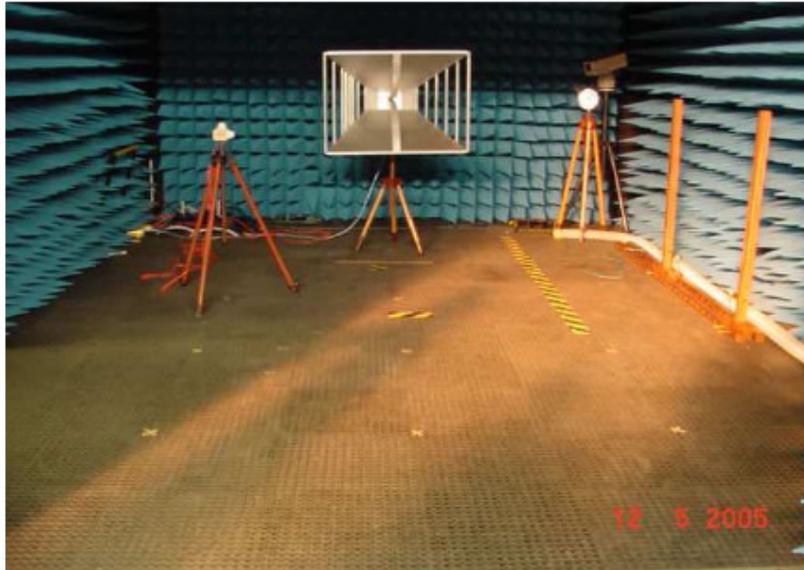
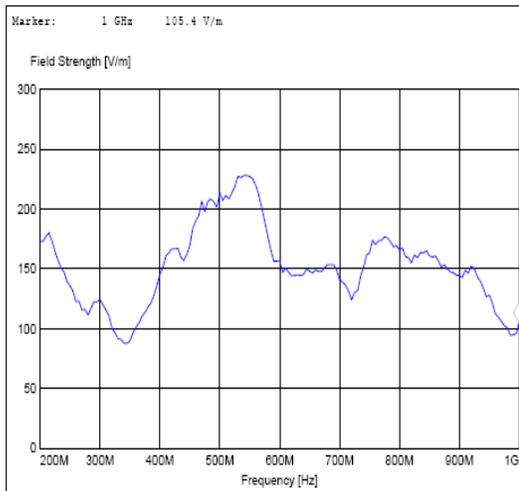


Figura 6.6-Disposição da antena corneta dentro da CSA.

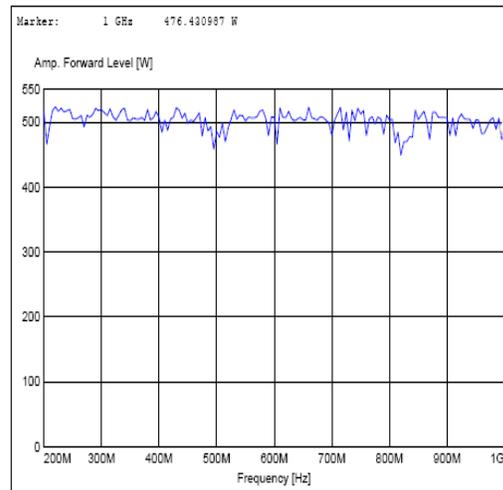
Um análise dos dados obtidos no primeiro experimento relevam que as características da antena tipo corneta modelo 3106 empregada nos testes cumpre com a maioria de requerimentos exigidos pela norma (com exceção do nível de erro de $\pm 3\text{dB}$ a cada $0,75\text{m}$ do ponto de referência). Neste experimento o máximo da potência (500W) do amplificador de RF disponível no laboratório foi utilizado. Isto pode ser verificado na figura 6.7 onde são apresentadas a resposta em função da frequência na posição 5 segundo o esquema da figura 6.5.

Para a análise detalhado dos dados, nas tabelas 6.2 e 6.3 estão relacionados os valores da intensidade de campo elétrico medidas nas posições 4, 5, 6, 7,8 e 9. Percebe-se que em certos pontos o limite de 3dB na diferença entre o ponto central e os pontos laterais é ultrapassado. [10].

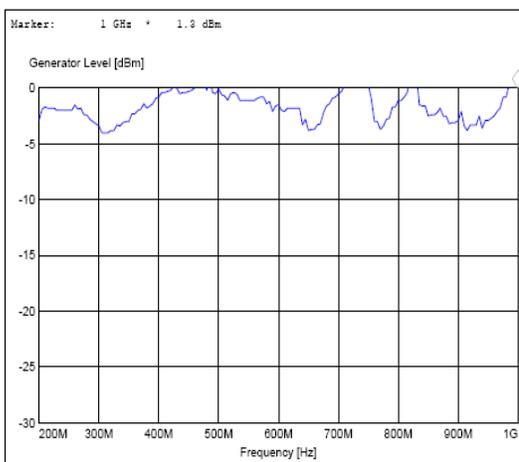
Estes resultados são atribuídos à directividade da antena corneta empregada nos testes, mas é importante lembrar que 95% dos valores medidos na posição 5 para toda a faixa de frequências são superiores a 100V/m .



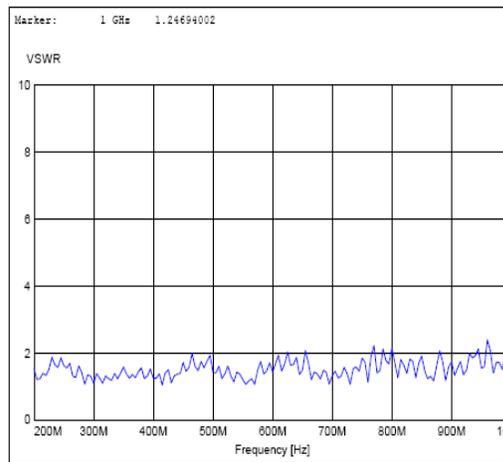
a)



b)



c)



d)

Figura 6.7-Resposta da antena tipo Corneta na posição 5. a) Intensidade de Campo elétrico, b) Saída do amplificador de RF, c) Saída do Gerador de sinais, d) VSWR

Tabela 6.2-Intensidade de Campo Elétrico antena Tipo corneta posição 4,5 e 6

FREQ(MHz)	INTESIDADE DE CAMPO ELETRICO [V/m]				
	Diferença dB	P4	P5	P6	Diferença dB
200	-2,92	125	175	140	-1,94
300	-1,11	110	125	110	-1,11
400	-7,66	60	145	75	-5,73
500	-4,51	125	210	150	-2,92
600	-2,98	110	155	125	-1,87
700	-2,80	105	145	105	-2,80
800	-4,61	100	170	105	-4,19
900	-0,95	130	145	125	-1,29
1000	-0,96	94	105	110	0,40

Tabela 6.3-Intensidade de Campo Elétrico antena Tipo corneta posição 7,8 e 9.

INTESIDADE DE CAMPO ELETRICO [V/m]					
FREQ (MHz)	Diferença dB	P7	P8	P9	Diferença dB
200	-1,11	110	125	110	-1,11
300	-0,35	120	125	120	-0,35
400	0,53	85	80	90	1,02
500	-8,94	25	70	35	-6,02
600	-2,40	110	145	105	-2,80
700	-2,98	110	155	140	-0,88
800	-3,52	100	150	120	-1,94
900	-1,16	70	80	75	-0,56
1000	-0,83	50	55	50	-0,83

6.3 ANTENA LPDA FIAT

Esta é uma antena LPDA convencional (figura 6.8) que opera na faixa de 200 a 2000MHz com VSWR médio de 1:1.5. Com relação ao ganho, segundo o fabricante apresenta 6,5dB para a maioria das frequências, com uma impedância de entrada de 50 Ω [31]. O procedimento para a análise de campo elétrico foi similar ao empregado com antena corneta. Os resultados da intensidade de campo elétrico estão nas tabelas 6.4 6.5, com a diferença que a potência aplicada foi de 400W constantes para efeitos de comparação com a Op2.



Figura 6.8-Antena LPDA modelo ETS 3148

Tabela 6.4-Intensidade de campo elétrico posições 4, 5 e 6 da LPDA FIAT

INTESIDADE DE CAMPO ELETRICO [V/m]					
FREQ (MHz)	Diferença dB	P4	P5	P6	Diferença dB
200	-1,04	134,8	151,9	118,5	-2,16
300	-0,38	106,3	111	109,3	-0,13
400	0,88	32,9	29,73	29,9	0,05
500	-4,57	75,2	127,2	74,7	-4,62
600	-0,75	137,3	149,7	102,8	-3,26
700	1,65	82,7	68,4	89,3	2,32
800	-10,65	23,55	80,3	36,6	-6,82
900	-3,81	80,2	124,3	70,7	-4,90
1000	-2,24	73,1	94,6	70,7	-2,53

Tabela 6.5-Intensidade de campo elétrico posições 4, 5 e 6 da LPDA FIAT

INTESIDADE DE CAMPO ELETRICO [V/m]					
FREQ (MHz)	Diferença dB	P7	P8	P9	Diferença dB
200	-0,48	89,8	94,9	82,6	-1,21
300	-0,65	109,4	117,9	117,8	-0,01
400	0,36	85,1	81,6	82,5	0,10
500	-3,27	23,61	34,4	22,8	-3,57
600	-2,91	46,7	65,3	45,6	-3,12
700	-0,90	77,5	86	71,1	-1,65
800	-0,30	88,1	91,2	79	-1,25
900	1,32	50,9	43,7	53,2	1,71
1000	-4,60	17,54	29,8	17,15	-4,80

6.4 CONSTRUÇÃO DA ANTENA OP2

Na tabela 6.6 e 6.7 são apresentados detalhes físicos da construção da antena, já na figura 6.9 indica-se detalhes da aparência final e o suporte do mastro da antena Op2.

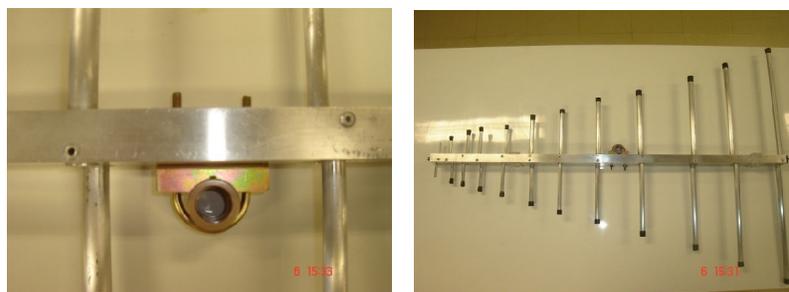


Figura 6.9-Detalhes físicos da antena. a) Suporte, c) visual

Tabela 6.6-Detalhes físicos dos elementos da antena Op2

Elemento	Fio (cm)	Distância entre elementos (cm)	Diâmetro (mm)	Diâmetro comercial (in)
1	74,50	16,00	18	5/8
2	64,00	13,00	16	5/8
3	50,20	16,00	16	5/8
4	42,00	13,00	16	5/8
5	36,00	11,10	14	1/2
6	31,60	8,90	14	1/2
7	26,00	8,20	14	1/2
8	21,00	7,40	11	3/8
9	18,60	4,70	11	3/8
10	15,60	4,60	11	3/8
11	13,20	4,10	11	3/8
12	10,80		6	1/4

Tabela 6.7-Detalhes físicos da construção da antena Op2

Estrutura alimentadora:	25x25 mm
Comprimento:	1.1m
Material:	Alumínio
Linha de transmissão:	Cabo coaxial RG 214U
Terminal:	N macho

6.5 MEDIDA DO SWR

Estes testes foram realizados inicialmente com o método da linha fendida e comparados com resultados obtidos com o analisador Agilent Technologies E749A , equipamentos disponíveis no laboratório de antenas da UnB.O método da linha fendida é um dos métodos mais antigos para medir impedância em linhas de transmissão. Os equipamentos foram:

- Linha fendida Hewlett- Packard modelo 85C
- Indicador de SWR Hewlett- Packard modelo 415B
- Gerador de frequência

Com esses equipamentos é possível medir impedância em linhas de transmissão que operem em frequências desde 400 MHz (375 MHz no Agilent) a 5GHz, dado que na linha fendida os máximos ou mínimos estão separados em $\lambda/2$ e o comprimento da linha é de apenas 450mm.

Nos laboratórios da FIAT empregou-se o Network Analyser equipamento que permitiu realizar as medições na faixa completa de 200MHz a 1GHz.

O resultado do VSWR da antena Op2 resultou em valores acima de 1:2 em algumas frequências. Esta medição apresentava variações devido à ligação entre a linha de transmissão da antena, o ponto de alimentação na ponta da antena e da separação entre as partes da estrutura principal da mesma. Este resultado pode ser melhorado se a união entre as partes da linha de transmissão e a estrutura da antena fosse aprimorada mecanicamente dada a diferença de materiais.

A antena LPDA da FIAT apresentou uma excelente resposta de onda estacionária tal como é descrito no manual fornecido pelo fabricante [31].

O resultado das duas medições comparadas com o resultado das simulações no NEC e no HFSS assim como a disposição de equipamentos de medida no LACE são apresentadas na figuras 6.10, 6.11 e 6.12.

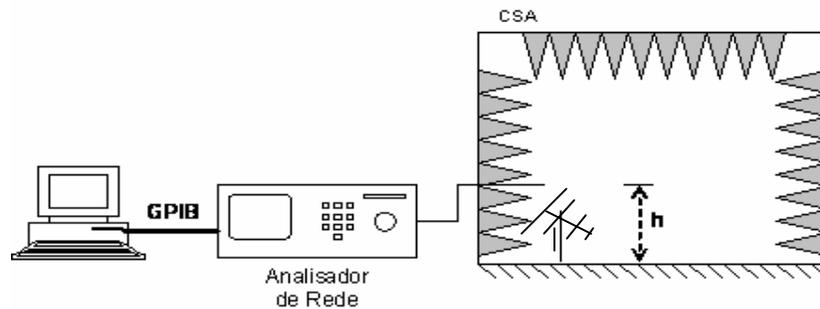


Figura 6.10-Disposição de equipamentos para a medição de VSWR

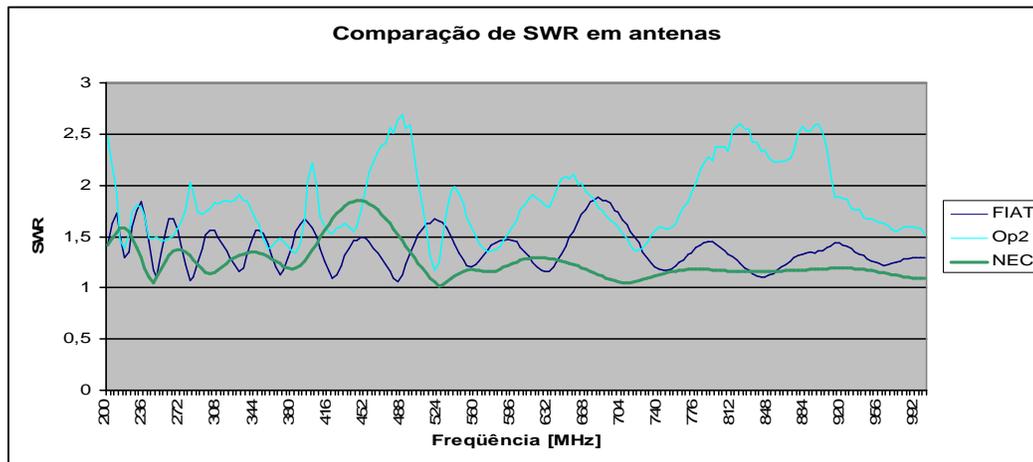


Figura 6.11-Comparação do VSWR medido e o simulado.

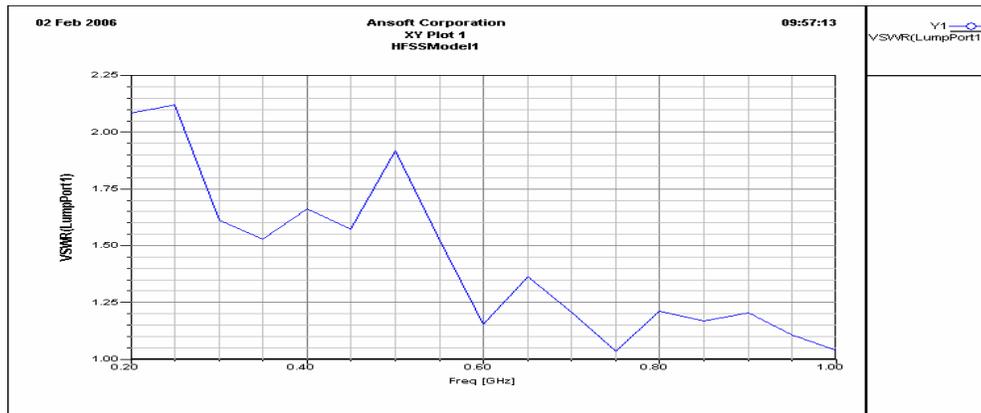


Figura 6.12-Simulação de VSWR em HFSS com frequência central de 600MHz

Os resultados com simuladores revelaram-se otimistas. A razão é que a fonte de alimentação nas ferramentas de análise é perfeitamente acoplada, sem perdas e não está sendo considerado nenhum tipo de conector ou linha de transmissão. Mesmo assim, o resultado da antena Op2 foi em média de 1:2.

6.6 MEDIDA DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Este teste foi realizado com ajuda de outras antenas que atuaram como transmissoras nas frequências de 400MHz e 700MHz com um ganho de 8dB aproximadamente [25]. Estas antenas foram localizadas a uma distância de 15m com relação à antena receptora, neste caso a Op2. Na antena construída variou-se o ângulo de orientação de 0 a 360° medindo simultaneamente a variação em dB de potência recebida para cada posição a cada 15°.

Nas figuras 6.13 e 6.14 onde são apresentados os resultados do diagrama de radiação para 400 e 700MHz pode-se ver a correspondência aproximada das medições frente ao resultado obtido com o NEC.

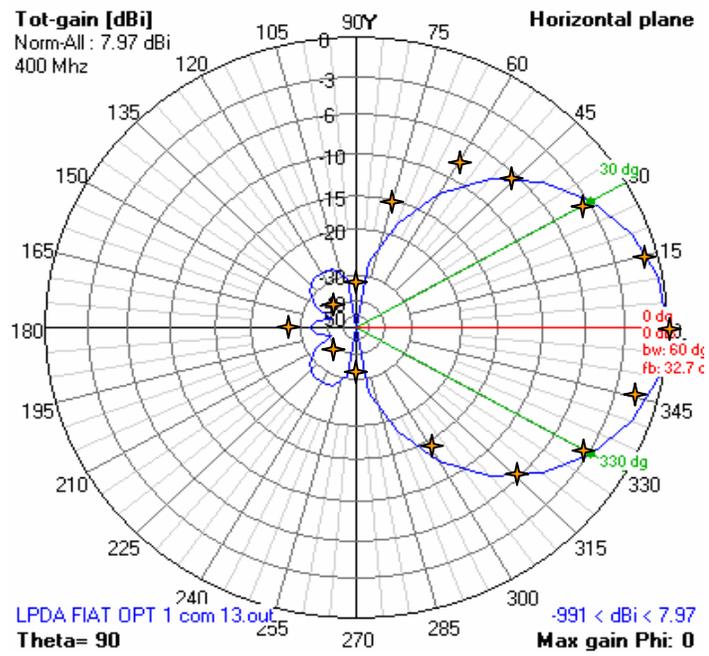


Figura 6.13-Resultado do diagrama de radiação em 400MHz

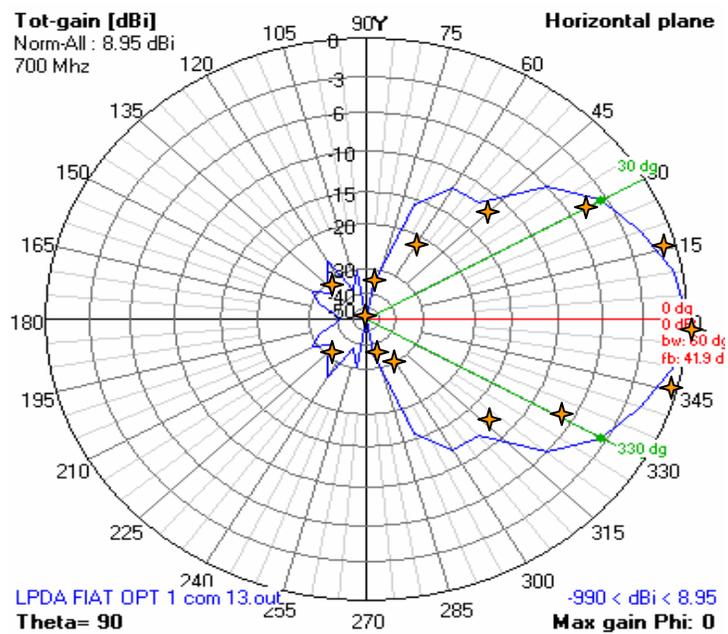


Figura 6.14-Resultado do diagrama de radiação em 700MHz

6.7 MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO

Novamente foi empregada a disposição de equipamentos apresentada na experiência de medição de distribuição de campo elétrico com a antena tipo corneta, mas desta vez para antena Op2. Os dados adquiridos foram tomados em passos de 5MHz. Da mesma maneira que nas antenas anteriores, a figura 6.15 apresenta a instalação da antena dentro da CSA do LACE. São relacionados na tabela 6.7 e 6.8 os dados correspondentes a intensidade de campo elétrico e a diferença entre os pontos laterais dos probes localizados nos pontos 5 e 8. Estão indicados em amarelo os pontos com diferença superior a $\pm 3\text{dB}$.

Estes pontos apresentam-se em maior quantidade na LPDA FIAT. Portanto neste quesito a LPDA Op2 é superior a LPDA FIAT, entre tato as dimensões da antena Op2 são maiores que LPDA FIAT. Assim mesmo, nenhuma das duas conseguiu ultrapassar os 100v/m (só em alguns pontos o valor do campo elétrico está acima dos 100V/m sendo que foi fornecido uma potência de 400W relativamente constantes para todos os testes).

Mesmo com a antena LPDA do LACE e com 400W de potência de entrada, chegou-se a ter valores de 25 V/m, situação que não foi verificada nos resultados obtidos com a antena corneta. De outro lado, pode-se ver que o comportamento das duas antenas frente à distribuição de campo elétrico é similar. O valor mais alto em media foi de 75 V/m.

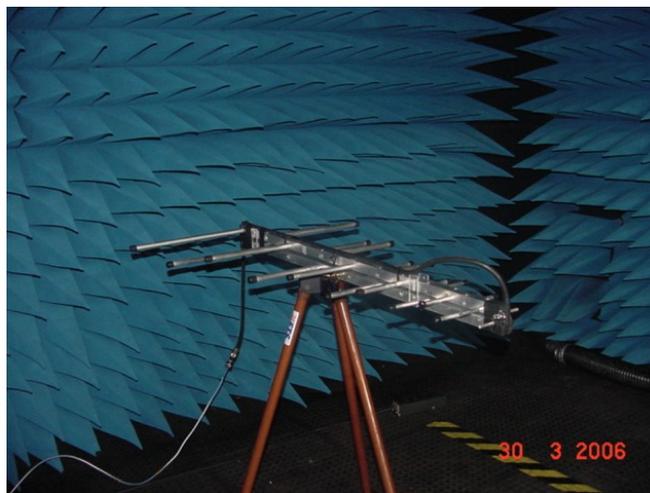


Figura 6.15-Disposição da antena Op2 dentro da CSA do LACE FIAT

Tabela 6.8-Intensidade de campo elétrico posições 4, 5 e 6 da Op2.

INTESIDADE DE CAMPO [V/m]					
FREQ (MHz)	DIF dB	P4	P5	P6	Dif dB
200	-0,34	91,4	95,1	79,5	-1,56
300	-0,72	127,7	138,7	117,1	-1,47
400	0,72	46,8	43,1	53,9	1,94
500	-3,59	82	124	63	-5,88
600	-3,62	90,2	136,8	79,1	-4,76
700	0,01	74,6	74,5	70	-0,54
800	-6,48	31,9	67,3	28,6	-7,43
900	-1,80	70	86,1	76,8	-0,99
1000	1,55	52,1	43,6	49,6	1,12

Tabela 6.9-Intensidade de campo elétrico posições 7, 8 e 9 da Op2.

INTESIDADE DE CAMPO [V/m]					
FREQ (MHz)	DIF dB	P7	P8	P9	Dif dB
200	1,17	62,7	54,8	57,3	0,39
300	-0,68	110	118,9	106,6	-0,95
400	-0,68	78,8	85,2	86,9	0,17
500	1,79	36,6	29,8	41	2,77
600	-1,70	44,8	54,5	49,4	-0,85
700	-0,31	90,4	93,7	65,7	-3,08
800	-3,99	37,6	59,5	70	1,41
900	1,85	40,7	32,9	35,2	0,59
1000	-2,60	24,03	32,4	30,7	-0,47

6.8 CORRELAÇÃO ENTRE SIMULAÇÃO E TESTES

Com o objetivo de comparar o desempenho da antena Op2 frente ao funcionamento da antena LPDA da FIAT, na figura 6.16 e 6.17, é apresentado o comportamento da intensidade de campo elétrico em função da frequência das duas antenas na posição 5 e na posição 8 respectivamente. Este comportamento não é constante devido a que a CSA possui plano terra e a intensidade de campo pode aumentar como diminuir conforme a frequência [27] [29].

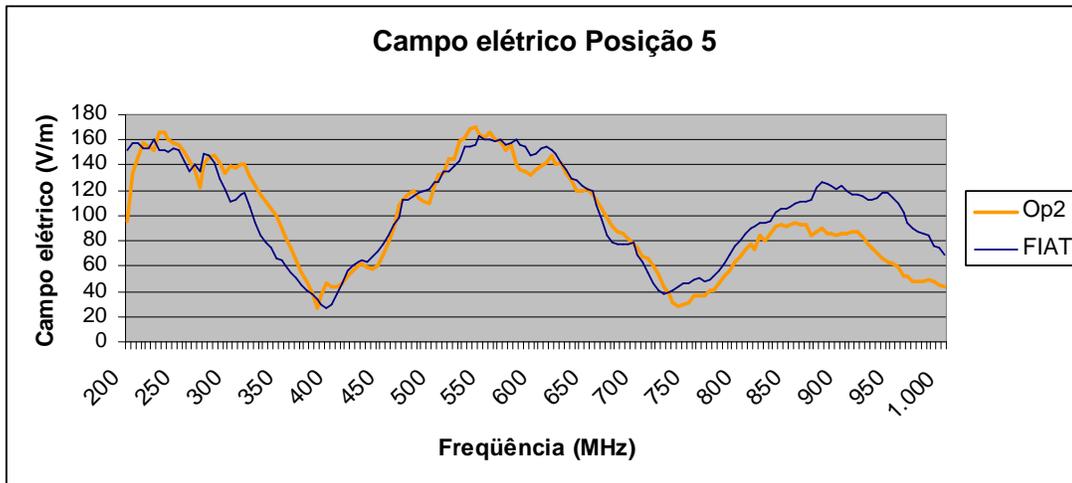


Figura 6.16-Intensidade de campo elétrico em frequência posição 5 antenas LPDA

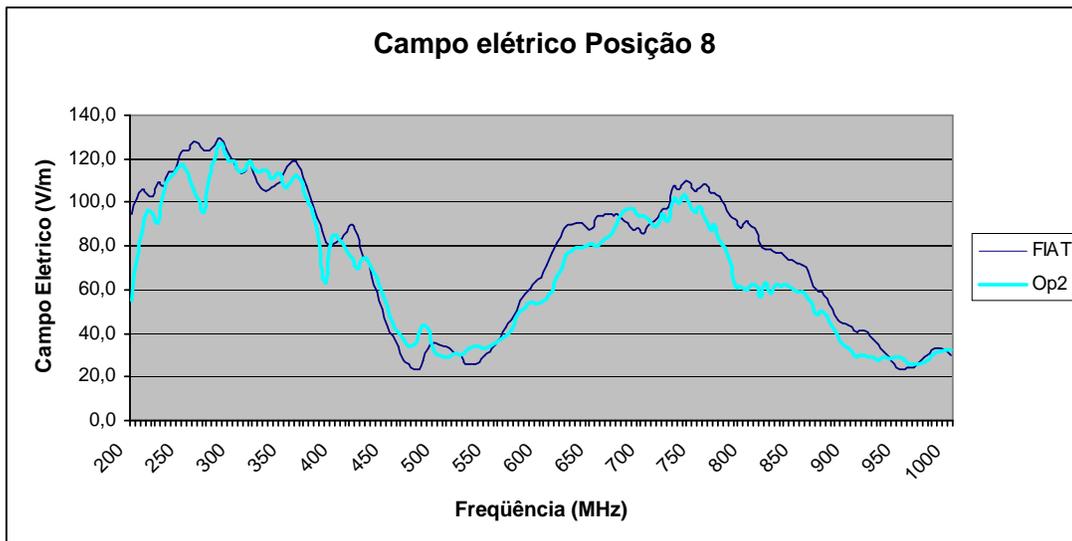


Figura 6.17-Intensidade de campo elétrico em frequência posição 8 antenas LPDA

Simulando o comportamento da intensidade de campo elétrico no espaço livre com o NEC (figura 6.18), percebe-se que esta aumenta conforme a frequência e é maior comparada com os dados anteriores, fato que seria apresentado nos testes se a câmara fosse completamente Anecóica.

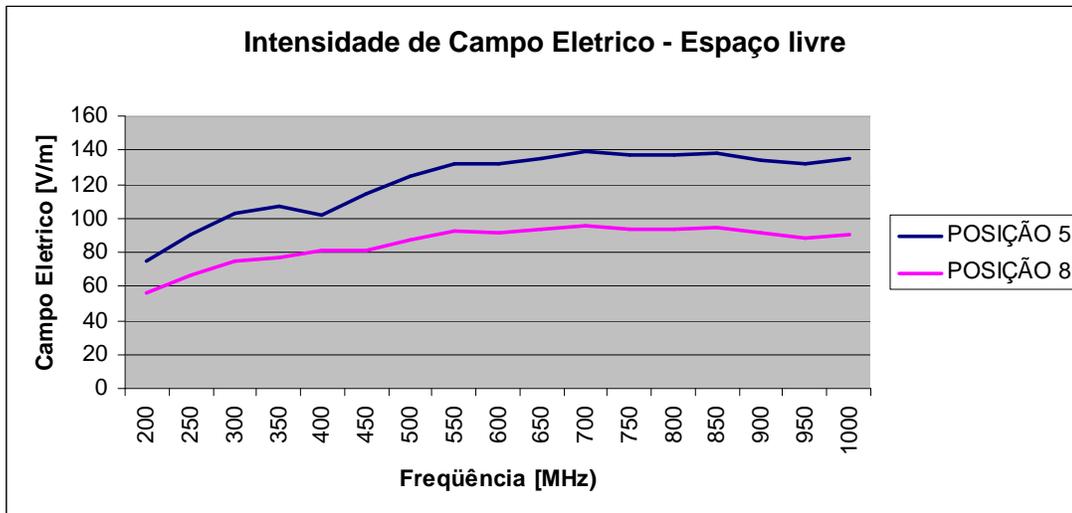


Figura 6.18-Simulação da Intensidade de campo elétrico no espaço livre LPDA Op2.

Como essa não é a situação existente na CSA da FIAT e com o intuito de comparar os resultados, foi realizada uma outra simulação avaliando o campo elétrico da antena Op2 a um metro de altura com relação ao solo em uma situação de plano terra. Os resultados obtidos foram muito similares e são apresentados na figura 6.19 e 6.20.

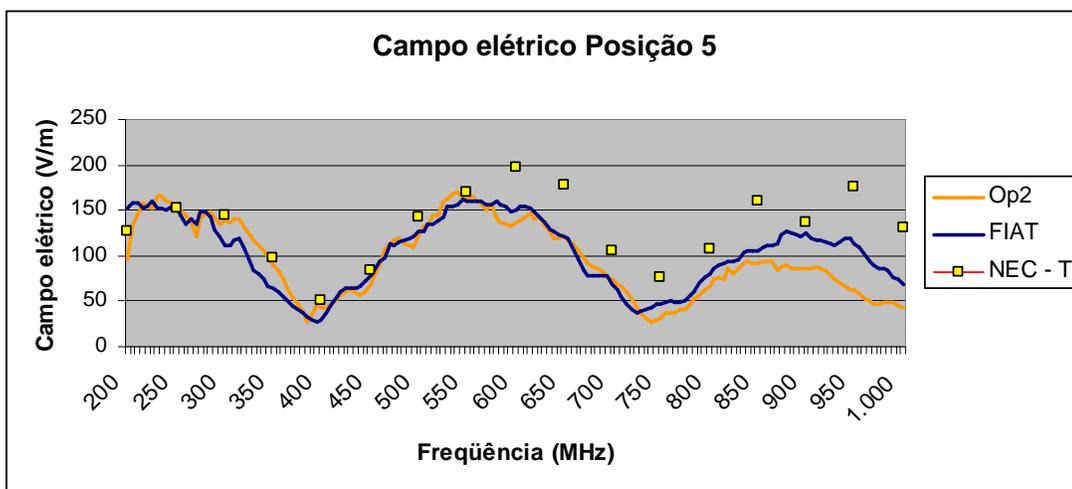


Figura 6.19-Comparação da Intensidade de campo elétrico com plano terra para LPDA Op2 e LPDA FIAT posição 5.

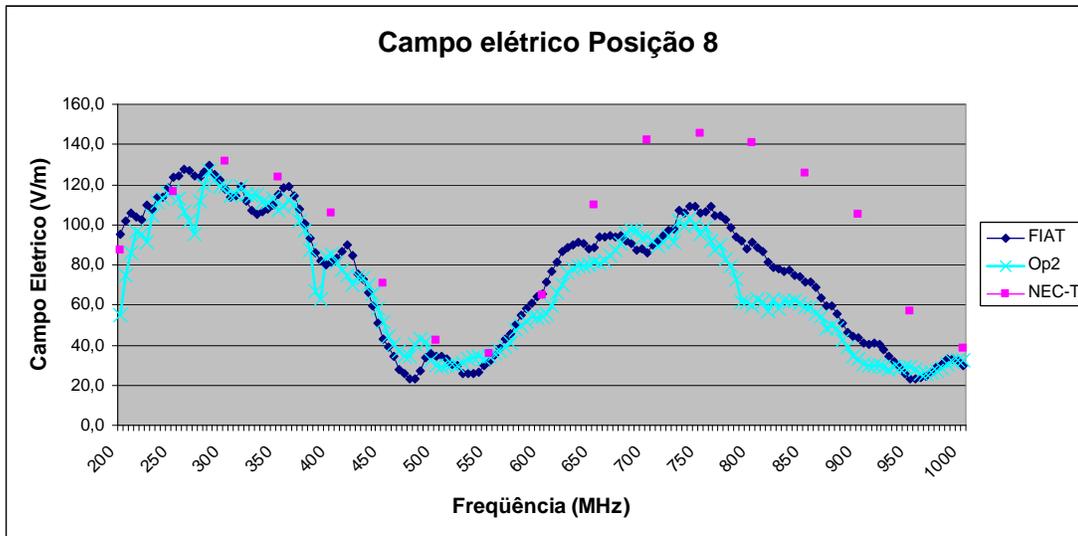


Figura 6.20-Comparação da Intensidade de campo elétrico com plano terra LPDA Op2 posição 8.

Note-se que existem discrepâncias nas frequências superiores a 600 MHz fato que é atribuído ao alto SWR presente na Op2, assim como o fato de não considerar o efeito dos conectores e linha de transmissão. Mesmo assim esta discrepância atinge um valor máximo de 4.8 dB.

CONCLUSÃO

A antena Op2 apresentou um comportamento muito similar com relação à distribuição de campo elétrico comparado com a antena LPDA do LACE. Em vários requisitos do teste a antena Op2 teve um melhor desempenho que a LPDA do LACE, mas é importante ressaltar que a antena FIAT tem uma largura de banda maior.

Os testes de compatibilidade eletromagnética podem ser realizados com qualquer uma das antenas. Destaca-se que a antena Op2 oferece uma maior intensidade de campo em algumas frequências, e que a antena FIAT tem maior largura de banda. Este fator pode ser importante se a faixa de operação do amplificador de RF fosse até 2GHz .

Manter valores de 100V/m para a maioria das frequências de teste não seria possível com as antenas LPDA já que não é proporcionada uma distribuição de campo uniforme em toda a faixa de frequências, mas esse comportamento é devido ao chão metálico da câmara.

7. CONCLUSÃO

No projeto de automóveis, a análise de CEM é fator importante na hora de estabelecer níveis de SEM em equipamentos eletrônicos embutidos em sistemas integrados. Hoje estes sistemas são responsáveis pela segurança e o desempenho dos veículos. Mesmo que existam normas internacionais para orientar os testes de CEM em automóveis, não existe um consenso único nem uma atualização frente aos novos desenvolvimentos da tecnologia. Estes desenvolvimentos necessitam de soluções baseadas na mitigação de emissões eletromagnéticas para níveis estabelecidos nas normas. No entanto estas normas não são objetivas frente alguns fenômenos que fazem parte da propagação das ondas, tais como reflexões e interação entre a antena e o automóvel.

Esta pesquisa se insere na proposta de utilizar modelos reduzidos (automóveis pela metade) na CSA do LACE da FIAT. Um dos objetivos é a avaliação do procedimento em fase das normas internacionais.

Referente a análise e síntese de antenas, as duas ferramentas de simulação empregadas (NEC e HFSS) permitiram estudar o comportamento das principais características no projeto de antenas. Mas seu uso deixa claro que no processo de otimização iterativa, o Método dos Momentos apresenta um melhor desempenho frente ao Método dos Elementos Finitos. Isto foi verificado a través do projeto de uma antena LPDA básica, que foi otimizada com o intuito de reduzir as dimensões da estrutura e aprimorar parâmetros em algumas faixas de frequência (ganho e VSWR).

O método dos Algoritmos Genéticos (AG) é fácil de ser implementado e mais ainda com uma ferramenta interativa como o NEC, onde é possível estabelecer uma grande quantidade de variáveis e ponderação de parâmetros. De outro lado o método apresenta uma alta sensibilidade, aspecto que foi comprovado na fabricação e teste da antena, já que perde algumas das propriedades fundamentais do projeto da antena LPDA básica.

Embora a antena houvesse sido otimizada, fatores como a intensidade de campo elétrico, a mudança de centro de fase da antena LPDA em função da frequência sugerem o uso da antena tipo corneta para este tipo de testes.

Como sugestão à continuidade do projeto é interessante viabilizar implementação de mais pontas de prova isotrópicas para medir campos elétricos. Esta situação permitiria caracterizar de uma maneira mais ágil a distribuição do campo dentro da câmara.

Do ponto de vista das simulações, seria interessante contar com uma outra ferramenta de análise que permita avaliar o automóvel completo conforme aos objetivos do projeto. Esta ferramenta poderia estar baseada no Método dos Momentos, baseando-se no desempenho apresentado com o análise preliminar descrito neste trabalho.

Este cenário permitiria o estudo de CEM nos automóveis de produção recente, conformados por materiais como plástico e fibra de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SANTOS G (2002), Considerações do ambiente eletromagnético urbano na análise de interferências em veículos automotores, Tese de mestrado, Universidade Federal de São Paulo- USP, São Paulo, Brasil.
- [2] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) <http://www.lit.inpe.br>
- [3] Leonardo Alvarenga (2003), Correlação de medidas de campos eletromagnéticos irradiados em câmaras semi- anecóicas de grande porte e de dimensões reduzidas, Proposta técnica projeto. FIAT S.A. Betim- MG. Brasil.
- [4] Kenneth I. Kaiser, Electromagnetic Compatibility Handbook. CCR PRESS, 2005.
- [5] Terense Ribak, Automotive Electromagnetic Compatibility , Kluwer Academic publisher, 2004.
- [6] Brian F. Laurence, Anechoic Chambers, Past and Present. Conformity. 2005.
- [7] L.H Hemming, Electromagnetic Anechoic Chambers – A fundamental design and specification guide, John Wiley & Sons, 2002.
- [8] Martin Wiles, Chambers for EMC Conformity Standards, ETS – Lindgren. Conformity annual guide 2004.
- [9] P. Andersen, Kimball Williams, Underwriters Laboratories, A Review of Today's Automotive EMC Standards, December 2003.
- [10] ISO 11451 “Road vehicles – Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – Vehicle test methods”.
Part 1: General and definitions (ISO11451-1: 2002).
Part 2: Off vehicle radiation source (ISO11451-2: 2002).
Part 4: Bulk current injection (ISO11451-4: 1st Edition 1995).
- [11] ISO 11452 “Road vehicles – Electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – Component test methods”
Part 1: General and definitions (CD ISO11452-1: 2002).
- [12] COMMISSION DIRECTIVE. 95/54/EC of 31 October 1995 adapting to technical progress Council Directive 72/245/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to the suppression of radio interference produced by spark-ignition engines fitted to motor vehicles and amending Directive 70/156/EEC on the approximation of the laws of the Member States relating to the type-approval of motor vehicles and their trailers.

- [13] COMMISSION DIRECTIVE. 2004/104/EC of 14 October 2004.
- [14] Agencia Nacional de Telecomunicações –ANATEL, Resolução No. 303 de 2 de julho de 2002. Anexo técnico, “Diretrizes para limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variáveis no tempo(até 300 GHz)”.
- [15] CA Balanis, *Antenna Theory—Analysis and Design*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1997).
- [16] *Antenna theory and design*. Warren L. Stutzman. Second edition.
- [17] J Kraus, *Antennas*, Mc Graw-Hill.
- [18] 3D Electromagnetic-Field Simulation for High-Performance Electronic Design.
<http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>
- [19] Numerical Electrical Code files, versão 5.5.4 www.qsl.net/wb6tpu/swindex.html
- [20] High Frequency structure simulator (HFSS) User’s Manual version 9.2.
- [21] Numerical Electrical Code (NEC) User’s Manual versão 5.5.4.
- [22] K. Balman, C.C. Bantin, Optimization of Log-periodic dipole Antennas. IEEE Transactions on antennas and propagation, March 1971.
- [23] You Chung Chung, Log-Period Dipole Array Optimization, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000.
- [24] Vilson Rodrigo Mognon, Algoritmos Genéticos Aplicados na otimização de antenas, Dissertação de mestrado, UFPR, 2004.
- [25] Amauri Gutierrez Martins, Algoritmos Genéticos Aplicados à Síntese de Antena, Dissertação de Graduação, UnB, 2005.
- [26] R.L. Haupt and S.E. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, Jhon Wiley & sons Inc, NY 1998.
- [27] Zhong Chen, Analysis of LPDA antennas for site validation and Radiated emission testing, IEEE 1999.
- [28] Experimental validation of time-domain electromagnetic models for field coupling into the interior of a vehicle from a nearby broadband antenna.
- [29] Z. Boury , D. Soaris . Theoretical and experimental evaluation of the gains of LPDA antenna placed over ground plane. HF radio system and techniques. 4-7 July 1994 –IEEE conference publication.
- [30] ETS Test Systems, Double – Ridged waveguide Horn Model 3106 Manual.
- [31] ETS Test Systems, Log-Periodic Dipole Array Antenna Manual.
- [32] ETS Test Systems, Field Monitor FM5004 Manual.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.