

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À AVALIAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Carlos Verre  
Júnior E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 28 / 07 / 2011

  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Carlos Verre Júnior

**Modelagem e Simulação de Antena GPS para  
Banda – L1 e a Influência do Ângulo do Vidro  
Dianteiro do Veículo na Recepção do Sinal de  
Satélite**

Campinas, 2011.

Carlos Verre Júnior

# **Modelagem e Simulação de Antena GPS para Banda – L1 e a Influência do Ângulo do Vidro Dianteiro do Veículo na Recepção do Sinal de Satélite**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Eletrônica

Orientador: Luiz Carlos Kretly

Campinas  
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V611m Verre Junior, Carlos  
Modelagem e simulação de antena GPS para a banda-L1 e a influência do ângulo do vidro dianteiro do veículo na recepção do sinal de satélite / Carlos Verre Junior. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Luiz Carlos Kretly.  
Dissertação de Mestrado (Profissional) -  
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Veículos. I.  
Kretly, Luiz Carlos. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.  
Título.

Título em Inglês: Modeling and simulation of GPS antenna for L1-band and the  
influence of the angle of the windshield of the vehicle at the  
reception of satellite signal

Palavras-chave em Inglês: Global Positioning System, Vehicles

Área de concentração: Eletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Gilmar Barreto, Silvio Ernesto Barbin

Data da defesa: 28-07-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA

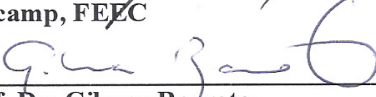
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL


**Modelagem e simulação de antena GPS  
para a banda-L1 e a influência do ângulo  
do vidro dianteiro do veículo na recepção  
do sinal de satélite**

Autor: Carlos Verre Junior  
Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Kretly

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Carlos Kretly, Presidente  
Unicamp, FEEC

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gilmar Barreto  
Unicamp, FEEC

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Silvio Ernesto Barbin  
USP- EPUSP

Campinas, 28 de julho de 2011

## Dedicatória

*A minha família com amor, admiração e gratidão por sua compreensão, carinho, presença e apoio incondicional ao longo do período de elaboração deste trabalho.*

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Carlos Kretly, por sempre pregar boas ideias e pelo apoio.

Ao Juliano Fujioka e Matheus Bornadiman, por terem me dado todo o suporte necessário com a ferramenta HFSS.

À minha família por sempre me mostrar o caminho do sucesso.

Agradeço a todos os meus amigos pela força e paciência durante todo este período.

Aos meus colegas da DELPHI, que contribuíram de forma direta e indireta para a realização deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Mecânica FEM e Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação FEEC, que forneceu o apoio e a base necessária para a realização da pesquisa.

"The reasonable man adapts himself to the world; the unreasonable man persists in trying to adapt the world to himself. Therefore, all progress depends on the unreasonable man."

(George Bernard Shaw)

## Resumo

O uso de dispositivos GPS/GSM em sistemas de monitoramento de veículos, para transmitir informações como posição e direção do veículo para centros de controle através de comunicação sem fio sobre redes GPRS tem se aprimorado rapidamente. Estes dispositivos tem se mostrado bastante eficientes garantindo uma maior segurança ao usuário que pode bloquear e localizar o seu veículo segundos depois de ter seu veículo furtado.

Além das informações de posição e direção, também se faz viável a obtenção antecipada de informações de acidentes na rodovia em que o condutor esta trafegando, além de emissões de alertas em casos de acidente acionando assim o serviço de resgate de maneira imediata, passando de maneira precisa a localização correta do veículo.

Além dessas vantagens, o condutor também pode contar com o suporte direto das montadoras que transmitem e recebem informações do veículo mantendo assim o usuário atualizado sobre as necessidades de manutenção em seu veículo.

Todos os sistemas de segurança do veículo, como por exemplo, o AirBag e o cinto de segurança, são projetados para evitar que após uma colisão os tripulantes do veículo sofram lesões, no entanto não são desenvolvidos para que o acidente seja evitado como é o caso da tecnologia de comunicação R2V.

Em busca de solucionar o problema, e antes mesmo que o acidente ocorra o motorista seja avisado, muitas tecnologias estão atualmente à prova pelas montadoras de veículos.

Este trabalho apresenta metodologias de projeto e simulações que representam de maneira qualitativa as dificuldades envolvidas em um projeto de rastreamento veicular utilizando as tecnologias de GPS/GSM, estudando o desenvolvimento e otimização de uma antena de GPS (ponto crítico) até a influência sofrida pela antena das partes metálicas do veículo quando a antena é localizada na parte interna do veículo (painel de instrumento), levando como base o teto do veículo (ponto ideal) para a solução e base de comparação da solução.

*Palavras Chave:* Veículo; Sistema de Posicionamento Global.



## Abstract

The use of GPS / GSM vehicle tracking systems to transmit information such as position and direction of the vehicle to control centers through wireless networks over GPRS has improved rapidly.

These devices have been quite effective by ensuring greater security to the user who can block and locate your vehicle seconds after the vehicle has been stolen.

Besides the position information and direction, it is also feasible to obtain advance information of accidents on the highway when the driver is traveling, in addition to emissions of alert in case of an accident triggering rescue services in a prompt manner, and allowing for the correct location of the vehicle.

Besides these advantages, the driver can also rely on the direct support of the makers that transmit and receive information from the vehicle thus keeping the user updated about the maintenance needs on the vehicle.

All current security systems of the vehicle, such as the airbag and seat belts, are designed to keep the passengers of the vehicle from suffering injuries, but are not developed to avoid an accident , as is the case of R2V communication technology.

In seeking to solve this problem, by warning the driver even before the accident occurs, many technologies are currently on trial for automakers.

This work presents design methodologies and simulations that represent a qualitative way of detecting the difficulties involved in a project vehicle tracking by using the technologies of GPS / GSM, studying the development and optimization of a GPS antenna (critical point) to the effect experienced by the antenna metal parts of the vehicle when the antenna is located inside the vehicle (instrument panel), taking as basis the roof of the vehicle (ideal point) to the solution and the basis for comparison of the solution.

*Key Words:* Global Positioning System, Vehicles.

## Lista de Figuras

Figura 1: Representação das tecnologias de comunicação R2V e V2V.....	1
Figura 2: Representação simplificada da constelação nominal de GPS.....	5
Figura 3: Domínio bidimensional, discretizado em elementos triangulares. ....	7
Figura 4: Fluxograma de método de pesquisa de desenvolvimento.....	16
Figura 5: Pareto de análise para determinação da influência dos fatores principais. ....	20
Figura 6: Sete passos para condução de um estudo de simulação.....	21
Figura 7: Modelo virtual da Patch antena de GPS desenvolvido para o estudo e suas dimensões (subH=4mm; subX=25mm; subY=25mm; Ca=3.68mm; Dtriang=2mm; feedX=0mm; feedY=2.2mm; Feed_length=4mm; Coax_in_rad=0.4mm; Coax_out_rad=1.34mm; L=19.25mm). ....	22
Figura 8: Perda por retorno da antena planar patch - Otimização do design da antena planar patch - DOE (Design Of Experiments com 700 simulações). ....	24
Figura 9: Perda por retorno da antena planar patch - Resultados obtidos por Algoritmo Genético para os valores próximos da frequência de 1,575GHz.....	25
Figura 10: Impedância Z [ $\Omega$ ] e o parâmetro S11 [dB], referido à frequência $f_0$ , da antena planar patch, para todas as simulações otimizadas em 1,575GHz. ....	26
Figura 11: Simplificação da antena (Fonte de Campo Próximo) para simplificação do modelo e aceleração do tempo de processamento da simulação.....	27
Figura 12: Modelo do veículo adotado como base para os estudos virtuais. ....	29
Figura 13: Modelo do para-brisa parametrizado com variação de 30° até 90°. O ângulo maior impõe restrições para a qualidade do sinal recebido pela antena localizada no painel de instrumentos do veículo.....	29
Figura 14: GPS TOM-TOM modelo XL utilizado para medir a variação na intensidade do sinal quando localizado dentro do veículo (influência do vidro) e quando colocado na mesma posição de fixação fora do veículo (sem a influência do vidro). ....	30
Figura 15: Gráfico de perda por retorno – Simulação e Validação Física – Resultado obtido para a antena otimizada. ....	32
Figura 16: Gráfico de VSWR – Simulação e Validação Física – Resultado obtido para a antena otimizada. ....	33
Figura 17: Smith Chart – Simulação e Validação Física – Resultado obtido para a antena otimizada. ....	33
Figura 18: Diagrama de radiação da antena localizada no ponto ideal para seu funcionamento (Teto do veículo). ....	34
Figura 19: Variação da intensidade de campo-elétrico com a variação do ângulo do vidro....	36
Figura 20: Variação na distribuição das linhas de campo-elétrico com o incremento do ângulo do vidro.....	37
Figura 21: Diagrama do sistema de medição - Setup de validação (antena + VNA HP8714ET).....	44
Figura 22: Cargas de calibração do analisador de espectro junto à linha de transmissão – Curto, aberto e carga 50 $\Omega$ .....	46
Figura 23: Esquema elétrico interno do analisador de espectro modelo HP8714ET.....	47
Figura 24: Antena planar patch afixada ao plano de terra e conector SMA.....	48

Figura 25: Representação através do diagrama de Venn para HDA (High Dielectric Antennas). .....	51
Figura 26: Antena DR (Dielectric resonator) retangular no espaço livre.....	52
Figura 27: Padrão de radiação no modo TE <sub>011</sub> de uma DR (Dielectric resonator).....	53
Figura 28: Setup de validação para se obter um diagrama de radiação de uma antena através da utilização de uma camara anecóica.....	57
Figura 29: Teste físico da antena (diagrama de radiação).....	58
Figura 30: Gráfico de WR de uma antena isotrópica em função de $\theta$ e $\phi$ .....	59
Figura 31: Diferentes formas para se representar um diagrama de radiação de uma antena....	60
Figura 32: Antena como um dispositivo de transição.....	62

## Lista de Tabelas

Tabela I: Guia para a construção do planejamento experimental.....	17
Tabela II: Pesquisa com clientes - Fatores que influenciam na seleção de um conceito para a integração do sistema de rastreamento na arquitetura eletroeletrônica do veículo. ....	28

# Índice

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Índice	xii
1 Introdução	1
1.1 Sistemas de rastreamento veicular e comunicação R2V (Roadside-to-Vehicle)	1
1.2 Sistemas de GPS (Sistema de Posicionamento Global)	4
2 Revisão bibliográfica	6
2.1 Método dos elementos finitos	6
2.2 Formulação matemática	8
2.2.1 Eletrostática	8
2.2.2 Campo de corrente estacionárias – Eletrocinética	9
2.2.3 Magnetostática	10
2.3 Condições de contorno	12
2.4 Limites de Radiação	12
2.5 Fronteiras perfeitas	12
2.6 Lumped Ports	13
3 Situação do problema	13
4 Objetivos	14
4.1 Objetivo da dissertação	14
5 Caracterização da Antena e Medidas	15
5.1 Material da antena	15
5.2 Estratégia de projeto da antena	15
5.3 Projeto Fatorial	19
5.4 Metodologia de Pesquisa	21
5.5 Criação do ambiente virtual para análise	21
6 Resultados	31
7 Discussão	37
8 Conclusões	39
Referências	41
APÊNDICE A - Técnica de Medida de Antena com VNA	44
APÊNDICE B – HDA (High Dielectric Antennas)	50
APÊNDICE C – Conceitos básicos de antenas	61
ANEXO A – Especificação da antena comercial usada como referência de projeto	69

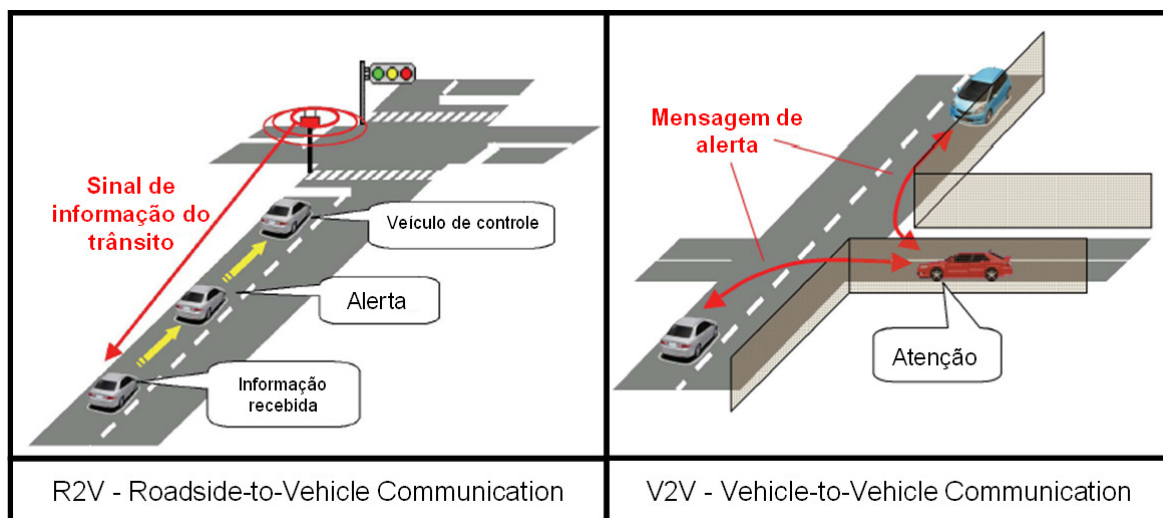
# 1 Introdução

## 1.1 Sistemas de rastreamento veicular e comunicação R2V (*Roadside-to-Vehicle*)

Atualmente, acidentes de trânsito são cada vez mais comuns e frequentes no intenso trânsito das grandes cidades. Frequentemente acidentes de trânsito matam e machucam inúmeras pessoas por dia.

Todos os sistemas de segurança do veículo, como por exemplo, o AirBag e o cinto de segurança, são projetados para evitar que após uma colisão os tripulantes do veículo sofram lesões, no entanto não são desenvolvidos para que o acidente seja evitado como é o caso da tecnologia de comunicação R2V que é viabilizada com a implementação do sistema de rastreamento no veículo.

Na busca de solucionar o problema, para que antes mesmo que o acidente ocorra o motorista seja avisado, muitas tecnologias estão atualmente à prova pelas montadoras de veículos. A figura abaixo mostra dois sistemas de comunicação chamados R2V (*Roadside-to-Vehicle*) e V2V (*Vehicle-to-Vehicle*):



**Figura 1: Representação das tecnologias de comunicação R2V e V2V.**

**Fonte: [41] Prioritized CSMA Protocol for Roadside-to-Vehicle and Vehicle-to-Vehicle Communication Systems.**

A utilização de um sistema de localização GPS (Global Positioning System) em conjunto com o sistema de comunicação GSM/GPRS já existente, como previsto pela resolução que determina [1] que o rastreamento é obrigatório mediante aprovação do usuário final para toda a frota de novos veículos que saíram de fábrica, facilita a implementação de um sistema

chamado de R2V (Roadside-to-Vehicle) ou então V2I (Vehicle-to-Infrastructure) por parte das montadoras, trazendo um atrativo bastante interessante para o usuário final.

A necessidade de implementação desses sistemas no automóvel vem apoiada [2] na resolução 245 do dia 27 de julho de 2007 onde o CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN no uso de suas atribuições resolve que “Todos os veículos novos, saídos de fábrica, produzidos no País ou importados a partir de 24 (vinte e quatro) meses da data da publicação desta Resolução somente poderão ser comercializados quando equipados com dispositivo antifurto”.

A vantagem de se adotar um sistema integrado à rede de telefonia celular é que desta maneira toda a infraestrutura necessária para o funcionamento do sistema já está implantada e pronta para funcionar.

A comunicação R2V é uma rede veicular sem fios que possibilita a troca de dados como a localização e a velocidade. O sistema analisa estes dados instantaneamente e pode ajudar a prevenir acidentes, avisando antecipadamente os condutores de perigos potenciais de outros veículos.

“A condução é uma tarefa muito complexa. Saber onde está e em que direção circula o outro veículo/conductor pode ser tão importante como deter o controle do nosso próprio veículo”, [3] afirmou Hans-Georg Frischkorn, Diretor Executivo de Sistemas Elétricos, de Controle e Software Globais da empresa General Motors. “Com a tecnologia V2V, podemos intensificar a consciência do condutor do ambiente em que circula para aumentar a segurança rodoviária, sem o distrair e de certo sem reduzir o seu nível de controle. Este sexto sentido permite aos condutores saberem o que se passa à sua volta, ajudando por isso a evitar acidentes e melhorar o fluxo do tráfego”.

Atualmente, é possível equipar os veículos com diversos sensores de segurança, incluindo sensores de radar ligados a dispositivos de controle da velocidade ou sensores de detecção de objetos no ângulo morto de um automóvel. Com esta tecnologia de grande alcance, é possível aumentar significativamente o raio e a cobertura dos sensores individuais, uma forma mais eficaz e econômica de observar e avaliar extensivamente as condições do tráfego circundante. Por outro lado, os sistemas de conforto do carro também ganharam um novo atrativo, como por exemplo o controle de melhor rota para os sistemas de navegação do automóvel escolhida através da obtenção da informação de trânsito nas vias e assim ajudando à melhorar o fluxo dos veículos nas rodovias.

Conforme o requerido pela resolução [2], o sistema de rastreamento veicular, deve ter uma precisão de 30 metros em 95% do tempo, e para que isso aconteça de maneira correta, é

necessário se tomar alguns cuidados na implementação do sistema dentro de um automóvel. O GPS é a peça-chave de informação em situações de assistência em casos de emergência, segurança, sistema de rastreamento de veículos e de navegação em áreas desconhecidas. [4] A escolha correta da antena, da embalagem, e do lugar correto da instalação é uma das peças mais importantes para um bom desempenho do sistema. Para se obter o sucesso é necessário se enfrentar vários desafios importantes, incluindo a cobertura uniforme de todos os satélites visíveis, a rejeição de sinais refletidos, o ganho do sistema e os requisitos de figura de ruído. O desempenho do sistema GPS será muito melhor quando a antena de GPS estiver localizada sobre um grande plano de terra (capo ou teto do veículo), com vista livre do céu, garantindo uma linha de visão direta com todos os satélites. A partir dessa ideia, a primeira escolha deve ser o teto do veículo ou o centro da tampa traseira do porta-malas.

Vê-se que para se propor uma antena localizada no teto do veículo, é necessário também considerar gastos adicionais com linhas de transmissões bastante caras, e deixando assim o produto mais caros.

Outro problema encontrado para localizar a antena do veículo no (teto, capo ou até mesmo na tampa do porta-malas), é que para a instalação da antena nesses lugares, faz-se necessário prever um furo adicional no veículo e isso não é aceito pelas montadoras de veículos, pois a questão estética do veículo é um atrativo muito importante para o mercado uma vez que o mercado procura por carros com um design atrativo.

Por questões de segurança do veículo, o ideal é que a antena não esteja ao alcance direto das pessoas no exterior, pois dessa maneira estaríamos diminuindo as possibilidades de um ladrão desativar o sistema apenas anulando a recepção do sinal de GPS danificando a antena exposta. Algumas considerações nesse sentido também devem ser previstas pelo software do sistema, onde quando desativado o sistema de localização de GPS, o sistema de comunicação por telefonia celular entra em ação e envia a informação da última localização registrada pelo sistema.

Como podemos perceber, a localização da antena de GPS em sistemas de rastreamento e sistemas de comunicação R2V são demasiadamente críticos, pois as paredes metálicas do veículo proporcionam uma dificuldade extra para os sistemas convencionais. [4] O painel frontal de instrumentos ou a tampa traseira seriam outras opções para colocar a antena GPS no interior do veículo. Para ambos os locais o ângulo de inclinação dos vidros é o fator chave no desempenho do sistema.

No entanto não temos determinado na literatura um ângulo que é considerado crítico para uma proposta de localização da antena no painel do veículo e nem tão pouco estudos virtuais



qualitativos que justifiquem a influência do ângulo do vidro na recepção do sinal pela antena de GPS localizada no painel de instrumentos do veículo.

## **1.2 Sistemas de GPS (Sistema de Posicionamento Global)**

Desenvolvido pelo departamento de defesa dos E.U.A (DoD - Department of Defense), o sistema de GPS vem hoje sendo utilizado por usuários de todo o mundo como o principal sistema de localização terrestre.

Atualmente, fabricantes de produtos eletrônicos do setor automotivo estão guiando suas linhas de produtos para disponibilizar o receptor de GPS em uma nova gama de veículos. Também conhecidos como produtos de telemática [15], estes produtos estão sendo disponibilizados com mais facilidades em veículos como carros de luxo, veículos médios e minivans.

O princípio da determinação da posição por GPS e a exatidão das posições dependem fortemente da natureza dos sinais. O sinal GPS é bastante complexo e oferece a possibilidade de determinação dos seguintes parâmetros: one-way (passivo) determinação da posição, a distância exata e determinação de direção (efeito Doppler). A transmissão de informações para navegação, simultânea recepção de sinais de vários satélites, fornecendo informações para correções do atraso ionosférico de sinais e insensibilidade contra interferências e efeitos de “multipath”.

A fim de cumprir todos estes requisitos, o sinal do receptor tem de entregar todas as informações, e isto é conseguido com uma boa antena e com um bom posicionamento da antena do sistema de GPS no veículo.

Por conta da elevada frequência de trabalho dos sistemas GPS [5], os resultados da localização são bastante precisos, no entanto sofre com o fato da frequência elevada não passar por obstáculos como paredes e etc. É por este motivo que os sistemas de GPS precisam para seu correto funcionamento uma visão livre para o espaço, ou melhor, para o satélite que prove as informações necessárias para a localização.

Dessa maneira, os usuários possuem à sua disposição, no mínimo, quatro satélites que podem ser rastreados de qualquer lugar da superfície terrestre.

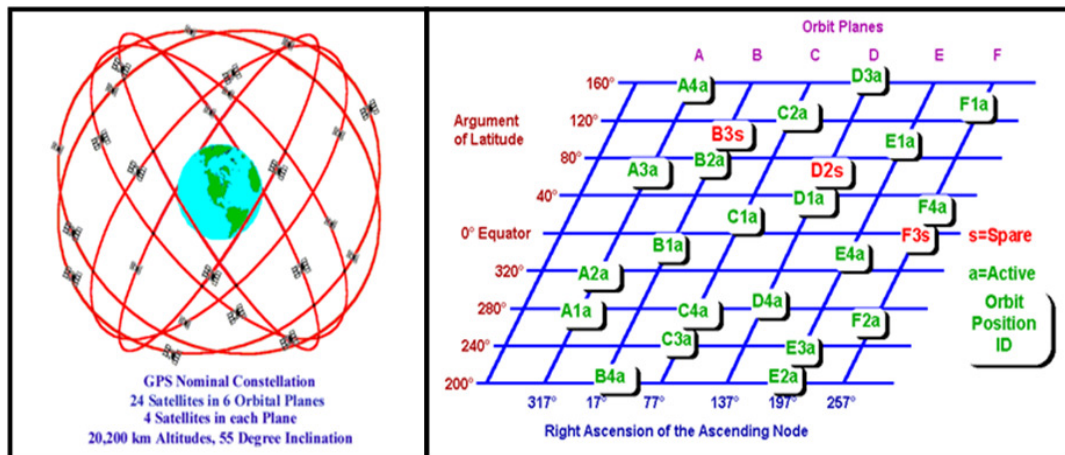
Do ponto de vista geométrico, apenas três medidas seriam suficientes, no entanto o sistema de GPS precisa de uma quarta referência por conta da não sincronização dos relógios do satélite com a do usuário.

Cada satélite GPS transmite dois sinais de portadora na faixa de micro-ondas, designados L1 e L2 (frequências localizada na Banda-L entre 1000 MHz e 2000 MHz). Receptores GPS civis usam a frequência L1 de 1575,42 MHz (19,05 centímetros de comprimento de onda).

A frequência L1 carrega os dados de navegação, bem como o código SPS (standard positioning code).

Embora a finalidade do GPS é proporcionar aos seus usuários a capacidade de calcular sua localização em três dimensões no espaço [6], ele não garante um funcionamento em 100% do tempo pela limitação da tecnologia. Para calcular sua localização em três dimensões, um receptor GPS deve ser capaz de obter sinais de pelo menos quatro satélites diferentes. Além disso, o receptor deve manter o seu sinal garantido por um tempo, que é o tempo necessário para receber a informação codificada na transmissão. Alcançar e manter os níveis desejados de sinais dos quatro (ou mais) satélites pode ser bastante difícil, pois cada sinal é transmitido em uma frequência (1,575 GHz), que é demasiado elevada para atravessar objetos sólidos no caminho do sinal. Por esta razão, os receptores GPS não podem ser usados dentro de casa.

A figura abaixo mostra o segmento espacial que garante o funcionamento do sistema de GPS e a distribuição de satélites nos planos orbitais.



**Figura 2: Representação simplificada da constelação nominal de GPS.**

Fonte: [39] [www.colorado.edu](http://www.colorado.edu).

Para garantir o funcionamento do sistema GPS em qualquer parte da superfície terrestre, o segmento espacial conta com 24 satélites distribuídos em 6 planos orbitais com 4 satélites em cada plano, numa altitude aproximada de 20200 km e uma inclinação de 55° em relação ao equador. A função do segmento espacial dentro do sistema é transmitir os sinais de navegação GPS, de forma contínua e permanente.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Método dos elementos finitos

Para utilizar o método dos elementos finitos [43], o objeto de estudo deve ter sua geometria subdividida em várias partes, que são os chamados elementos finitos. Essa subdivisão é chamada malha, sendo geralmente constituída, no caso bidimensional, de triângulos ou quadriláteros, cujos vértices são denominados “nós da malha”. É através dela que se monta um sistema de equações cuja solução permite determinar as grandezas de interesse no fenômeno utilizado. No caso eletromagnético, essa solução é o vetor potencial magnético ( $A$ ) ou o potencial elétrico ( $V$ ) em cada nó da malha, a partir dos quais é possível determinar os campos magnéticos ( $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$ ) ou elétricos ( $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{D}$ ) no interior dos elementos finitos e proceder os cálculos de energia, força, torque, parâmetros (indutâncias, capacitâncias, resistências) etc. Como um resultado, apenas formas limitadas, tais como circular, triangular, ou anel, podem ser rigorosamente analisados até agora. Recentemente, uma técnica de onda completa para microstrip de forma irregular foi desenvolvida, mas ainda era limitada pela aproximação, uma vez que as correntes de expansão em forma retangular foram usadas. Portanto, uma real e flexível análise de onda completa para a antena de forma arbitrária é necessário para uma ampla classe de problemas práticos [52].

O processo de otimização requer várias interações, onde são necessários cálculos para a determinação da impedância de entrada. Estas análises são realizadas por meio dos Elementos Finitos [55].

As tarefas para utilização do método dos elementos finitos descrita costumam ser divididas em três etapas, chamadas: pré-processamento, processamento e pós-processamento [43].

O pré-processamento engloba o desenho da geometria do objeto estudado, a geração da malha, a imposição das propriedades físicas dos meios envolvidos, isto é, dos materiais que constituem o objeto (ferro, cobre, ímãs permanentes, ar e etc.), a imposição dos valores das fontes de campo no objeto (densidade de corrente elétrica nas bobinas ou densidade de carga elétrica nos materiais) e a imposição das condições de contorno pertinentes ao fenômeno e ao objeto analisado.

Já o processamento inclui a montagem do sistema de equações [44], através dos dados do pré-processamento, e a sua resolução, que pode ser efetuada através de métodos diretos ou interativos, podendo ser linear ou não-linear e com coeficientes reais ou complexos.

O pós-processamento por sua vez, com os dados das etapas anteriores, permite a utilização dos resultados do método dos elementos finitos, através dos vários procedimentos para cálculo e apresentação das grandezas do fenômeno estudado.

O pós-processamento é constituído por:

- algoritmos que traçam linhas de campo ou equipotenciais sobre a geometria fornecida;
- os que calculam energia, força, torque e parâmetros;
- os que traçam gráficos de campo e potenciais sobre segmentos definidos no objeto;
- outros mais específicos para algum fenômeno ou;
- outras grandezas.

A aplicação do método dos elementos finitos na resolução de problemas do eletromagnetismo, como já foi discutida [43], exige um pré-processamento que consiste em subdividir o domínio em pequenos subdomínios, que na sua forma mais simples é um triângulo. Existem várias técnicas em que esta operação é realizada automaticamente. O software HFSS (High Frequency Structure Simulator) utiliza o algoritmo de Delaunay, face sua eficiência [54].

A figura abaixo mostra um domínio bidimensional, discretizado em elementos triangulares, sobre o qual será elaborado um estudo com o objetivo de se determinar a distribuição de potenciais elétricos ou magnéticos em toda sua seção transversal [43]:

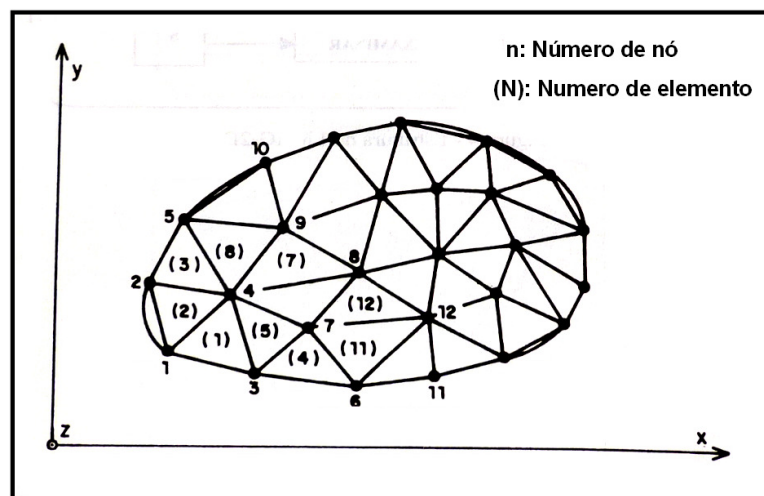


Figura 3: Domínio bidimensional, discretizado em elementos triangulares.

Fonte: [43] José Roberto Cardoso - Introdução ao método dos elementos finitos –  
Publicação independente (1ª Edição) 2008.

A partir desta distribuição de potenciais, obtemos as intensidades dos vetores de campo elétrico (**E**) ou magnético (**B**) no interior destes elementos.

Uma vez discretizado o domínio em estudo [44], se faz necessário então definir as regiões de controle envolvendo cada um de seus nós, construídas por segmentos de reta que passam pelos pontos médios das arestas ligadas ao nó e pelos baricentros dos triângulos que admitem o referido nó como vértice.

## 2.2 Formulação matemática

A formulação matemática a ser desenvolvida é centrada na utilização de elementos finitos triangulares, onde serão calculados os potenciais elétricos ou magnéticos nos seus vértices.

Assim sendo, temos três situações a analisar:

- Eletrostática;
- Campo de correntes (Eletro-cinética);
- Magnetostática;

Nos dois primeiros casos, o campo elétrico age em meios lineares, isto é, as permissividades ou condutividades presentes não são afetadas pela intensidade do campo elétrico, ao passo que na magnetostática a presença de meios ferromagnéticos introduz uma não linearidade que deve ser considerada.

### 2.2.1 Eletrostática

A aplicação do método dos elementos finitos na eletrostática é baseada na quarta equação de Maxwell (Lei de Gauss da eletrostática):

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q_i$$

**Onde:**

$\mathbf{D}$  = densidade de fluxo elétrico ( $C/m^2$ ).

$Q_i$  = quantidade total de cargas elétricas envolvidas pela superfície fechada  $S$  (C).

O vetor deslocamento **D** e o vetor campo elétrico **E** estão relacionados através da relação constitutiva:

$$D = \epsilon.E$$

Onde:

$\epsilon$  = permissividade elétrica do meio (constante para a maioria das aplicações).

O vetor campo elétrico  $E$  e a função potencial são associados através da relação:

$$E = -\nabla V$$

Sendo assim, o potencial elétrico num ponto qualquer no interior do elemento poderá ser expresso por uma função linear do tipo:

$$V(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y$$

Onde:

$\alpha_1, \alpha_2$  e  $\alpha_3$  = são função de  $V_1, V_2$  e  $V_3$ .

Em resumo, as contribuições dos fluxos do vetor deslocamento através das porções das superfícies que envolvem os nós 1, 2 e 3 do elemento (e) podem ser expressas matricialmente como segue:

$$\begin{bmatrix} E_1^e \\ E_2^e \\ E_3^e \end{bmatrix} = \frac{\epsilon}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ \textit{simétrica} & & b_3 b_3 + c_3 c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

Finalmente, a aplicação da quarta equação de Maxwell numa superfície fechada envolvendo o nó(i), resultará:

$$\sum_{e=1}^{NE} E_i^e = \sum_{e=1}^{NE} Q_i^e \quad i = 1, 2, 3, \dots, NN$$

### 2.2.2 Campo de corrente estacionárias – Eletrocinética

A mesma técnica utilizada na formulação do método dos elementos finitos na eletrostática é integralmente aplicada nos estudos de campo de correntes estacionárias. Neste caso, a equação que descreve o fenômeno é a equação da continuidade:

$$\oint_S J \cdot dS = 0$$

A relação constitutiva a ser considerada é a lei de Ohm:

$$J = \sigma.E$$

Onde:

$\sigma$  = condutividade do meio.

As deduções das integrais de superfícies são obtidas, para este caso, seguindo-se o procedimento idêntico ao desenvolvido na eletrostática, ou seja, substituindo-se simplesmente D por J e também  $\epsilon$  por  $\sigma$ , que resultará:

$$\begin{bmatrix} E_1^e \\ E_2^e \\ E_3^e \end{bmatrix} = \frac{\sigma}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ & b_2b_2 + c_2c_2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ \textit{simétrica} & & b_3b_3 + c_3c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

Finalmente, a aplicação da equação da continuidade numa superfície fechada envolvendo o nó(i) resultará:

$$\sum_{e=1}^{NE} E_i^e = 0 \quad i = 1,2,3,\dots,NN$$

A indeterminação do sistema anterior é levantada com a introdução das condições de contorno inerentes ao problema. A resolução do sistema de equações, após a introdução destas condições, fornecerá os potenciais elétricos em todos os nós do domínio, a partir dos quais são determinadas as intensidades do campo elétrico em cada elemento e as demais grandezas de interesse tais como: resistência ôhmica, potência dissipada, etc...

### 2.2.3 Magnetostática

Na magnetostática, a segunda equação de Maxwell (Lei de Ampère) é a que governa o fenômeno físico:

$$\oint_C H \cdot dl = \int_S J \cdot dS$$

A relação constitutiva a ser considerada é a que relaciona o vetor intensidade magnética (**H**) e o vetor campo magnético (**B**):

$$H = \nu B$$

**Onde:**

$v = 1/\mu$  é a relutividade do meio.

A partir da terceira equação de Maxwell  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ , define-se o vetor potencial magnético  $\mathbf{A}$ , tal que:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

E impõe-se ainda que:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$$

Nos estudos dos campos bidimensionais planos na magnetostática, admite-se que as correntes fluem na direção normal ao domínio de estudo. Assim sendo, supondo-se que este domínio está definido no plano  $(x, y)$ , o vetor densidade de corrente deverá ser tal que:  $\mathbf{J} = J\mathbf{u}_z$  com  $J$  constante no elemento.

Como as direções de  $\mathbf{J}$  e  $\mathbf{A}$  são idênticas, resulta que:

$$\mathbf{A} = A(x, y)\mathbf{u}_z$$

Representando esses resultados matricialmente, chegamos à matriz do elemento para a magnetostática:

$$\begin{bmatrix} E_1^e \\ E_2^e \\ E_3^e \end{bmatrix} = \frac{v}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 & b_1b_2 + c_1c_2 & b_1b_3 + c_1c_3 \\ & b_2b_2 + c_2c_2 & b_2b_3 + c_2c_3 \\ \textit{simétrica} & & b_3b_3 + c_3c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

Em cada elemento, temos contribuições para corrente concatenada de três contornos diferentes. Admitindo densidade de corrente uniforme no interior deles, essas contribuições serão tais que:

$$\begin{bmatrix} I_1^e \\ I_2^e \\ I_3^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J\Delta/3 \\ J\Delta/3 \\ J\Delta/3 \end{bmatrix}$$

Assim, a segunda equação de Maxwell aplicada a um contorno fechado envolvendo o nó resultará:

$$\sum_{e=1}^{NE} E_i^e = \sum_{e=1}^{NE} I_i^e \quad i = 1, 2, 3, \dots, NN$$



### 2.3 Condições de contorno

O modelo da antena, objeto do presente trabalho, utiliza dois tipos de condições de contorno: paredes elétricas e magnéticas. Estas restrições forçam respectivos vetores de campo elétrico e magnético a serem normais até o limite especificado. O software HFSS usa uma formulação baseada em potencial e, portanto, os limites de condições também devem ser especificados nestes termos [53].

### 2.4 Limites de Radiação

No software HFSS [54], os limites de radiação são usados para simular problemas não resolvidos e que permitem irradiar ondas infinitamente longe no espaço, tais como desenhos de antena. Através de uma caixa criada especificadamente para análise de limites de radiação, quando utilizado o software HFSS, ocorre a absorção das ondas de radiação, estabelecendo-se assim, um limite de análise. Na superfície de contorno de radiação estabelecido de segunda ordem, a condição de contorno usada é:

$$(\nabla * E)_{\text{tan}} = jk_0 E_{\text{tan}} - \frac{j}{k_0} \nabla_{\text{tan}} * (\nabla_{\text{tan}} * E_{\text{tan}}) + \frac{j}{k_0} \nabla_{\text{tan}} (\nabla_{\text{tan}} \bullet E_{\text{tan}})$$

Onde:

- $E_{\text{tan}}$  é o componente do campo E que é tangente à superfície.
- $k_0$  é a fase de espaço livre constante conforme descrito acima.

A segunda ordem condição de contorno de radiação é uma aproximação do espaço livre.

A precisão da aproximação depende da distância entre a fronteira e o objeto do qual gera a radiação, que no caso em fomento, é a antena.

### 2.5 Fronteiras perfeitas

No software HFSS [54], fronteiras perfeitas são as superfícies condutoras que são representadas perfeitamente nas estrutura. Por padrão, todos os modelos do HFSS que

possuem superfícies expostas ao fundo são assumidos como “Perfect E Boundaries” ou “fronteiras perfeitas”.

O software HFSS assume que toda a estrutura está rodeada por paredes perfeitamente condutoras. O campo elétrico é considerado normal para estas superfícies. A solução final de campo deve coincidir com o caso em que a componente tangencial do campo elétrico vai a zero nos limites de fronteiras perfeitas.

Todas as superfícies que foram atribuídas com materiais condutores perfeitos (PEC) são automaticamente impostos como uma fronteira perfeita pelo software HFSS.

## **2.6 Lumped Ports**

Lumped ports são semelhantes às portas de entrada de ondas tradicionais [54], mas pode estar localizado internamente e têm uma impedância complexa definida pelo usuário. Lumped ports computam o parâmetro  $S$  diretamente na porta e também são geralmente utilizadas como alimentação de antenas do tipo microstrip.

Uma lumped port pode ser definida como um retângulo a partir da borda da linha do plano de terra ou como uma tradicional porta de entrada de onda. O limite padrão é uma “perfect H” em todas as arestas que não entrem em contato com o metal ou com outra condição de contorno.

A impedância complexa definida por uma lumped port serve como a impedância de referência da matriz  $S$ . A impedância tem as características de uma onda que é utilizada para determinar a intensidade de uma fonte, tais como modal de tensão ( $V$ ) e modal de corrente ( $I$ ), através de uma normalização de energias complexas (a magnitude da potência complexa é normalizada para 1).

Quando a impedância de referência é um valor complexo, a magnitude da matriz  $S$  não é inferior ou igual a 1, mesmo para um dispositivo passivo.

## **3 Situação do problema**

Hoje em dia inexistente na literatura um material qualitativo que demonstre a influência sofrida pelas paredes metálicas do veículo para uma antena localizada na região interna do veículo (painel de instrumento) para a utilização do sistema de rastreamento veicular, utilizando a tecnologia de GPS (Sistema de Posicionamento Global).

## **4 Objetivos**

### **4.1 Objetivo da dissertação**

O objetivo desse trabalho é simular uma antena localizada na região interna do veículo (painel de instrumento) para a utilização do sistema de rastreamento veicular, utilizando a tecnologia de GPS (Sistema de Posicionamento Global), descrever as dificuldades envolvidas em um projeto de uma antena deste tipo e demonstrar a influência das partes metálicas do veículo quando variamos o ângulo do vidro dianteiro aumentando assim o teto do veículo e por sua vez a cobertura metálica da carroceria sobre a antena.

## 5 Caracterização da Antena e Medidas

### 5.1 Material da antena

A antena descrita neste trabalho foi desenvolvida com base nas especificações de uma antena comercial com o valor de  $\epsilon_r$  igual à 20.

Uma antena cerâmica com substrato composto por  $(Mg_{(1-n)}Ca_n)TiO_3$  semelhante foi descrita no artigo [11] onde o valor de  $\epsilon_r$  é igual à 28,2 e excelente coeficiente de temperatura 5 ( $ppm/^\circ C$ ). De acordo com o autor, em seu processo de fabricação, com base na formulação proposta, são misturadas quantidades precisas de pó de cerâmica fina com grãos de tamanho 0,5  $\mu m$ .

Uma antena do tipo microstrip é então impressa com uma camada fina de “cola de prata” usando uma técnica conhecida como “silk screen”, garantindo uma perfeita deposição da “cola de prata” sobre o substrato. É importante ressaltar a repetitividade desse processo. A antena é então aquecida para que ocorra uma fusão da “cola de prata” condutora em aderência ao substrato.

### 5.2 Estratégia de projeto da antena

A antena comercial escolhida foi o modelo G25-4E08843-D120 da empresa Amotech. Para avaliação inicial, fez-se necessário definir primeiramente um modelo que represente a antena e posteriormente, escolheu-se um procedimento para aperfeiçoar os resultados, conhecido como Design of Experiments (DOE).

Tal procedimento, conforme será debatido adiante e determinará as características da antena modelo, num processo inverso de cálculo.

Vale frisar que neste trabalho não foi construída nenhuma antena física, mas foi realizada, uma análise de uma antena disponível no mercado.

Foi proposto um modelo analítico da antena e foram realizadas diversas simulações com estes resultados.

A estratégia do projeto foi convencional, ou seja, equações eletromagnéticas foram utilizadas e uma série de regras de design clássico de antenas foram aplicadas.

A partir do projeto inicial “hand calculation”, os dados obtidos foram utilizados em um pacote de cálculo numérico – software HFSS – que usa FEM (método dos elementos finitos) e dessa maneira resultados de simulações foram obtidos.

A utilização do software de simulação HFSS (High Frequency Structure Simulator), permite criar setups de simulação onde as variáveis da antena mudam de acordo com limites e passos previamente estabelecidos. Esta é uma aproximação de primeira ordem.

O fluxograma abaixo representa as etapas que foram seguidas no desenvolvimento deste trabalho:

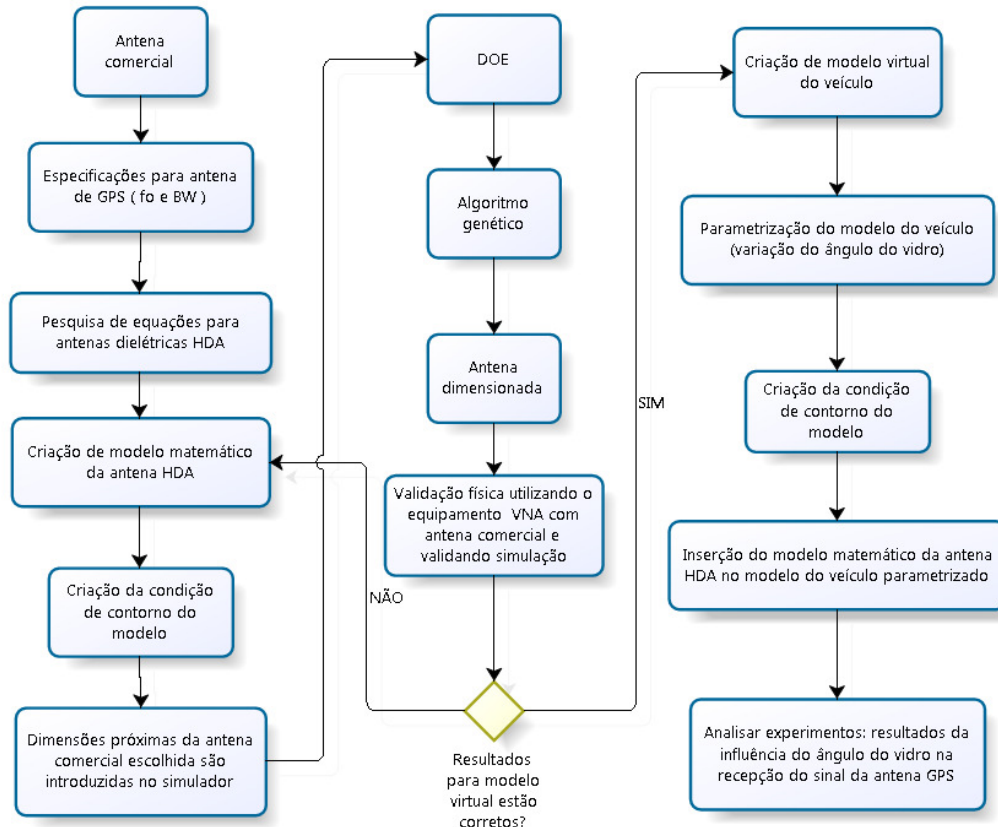


Figura 4: Fluxograma de método de pesquisa de desenvolvimento.

Inicialmente, a antena é inserida no simulador com dimensões obtidas pelo processo de calculo inicial.

Atribuídos estes valores iniciais, o Design of Experiments (DOE), quando associado à ferramenta algoritmo genético disponível no software HFSS, obtém as dimensões otimizadas da antena para as especificações estabelecidas.

Também conhecido como projeto de experimentos [21], o DOE refere-se a um processo de planejamento de experiências de uma maneira apropriada e organizada, onde os dados podem ser analisados por métodos estatísticos, resultando conclusões válidas e objetivas. Na tabela abaixo, foram descritos pelo autor [21], os passos para o desenvolvimento de um planejamento experimental:

Tabela I: Guia para a construção do planejamento experimental.

### REGRAS GERAIS

- 1) Estabelecer o problema e o objetivo de estudo;
- 2) Escolher os fatores (variáveis de entrada que se tem controle);
- 3) Escolher as variáveis de saída (resposta que se tem interesse);
- 4) Determinar a região de operação (faixa de valores para cada fator em que o sistema pode operar);
- 5) Especificar a região de interesse (uma sub-região do campo operacional dentro do qual é possível realizar o experimento);
- 6) Escolher o modelo estatístico (ANOVA, regressão, correlação espacial);
- 7) Selecionar o critério para escolher o DOE (por exemplo: variância mínima);
- 8) Escolher um projeto experimental apropriado (Latin square – quadrado latino, fatorial, composição central);
- 9) Selecionar os níveis dos fatores para cada teste;
- 10) Realizar os testes e coletar os dados;
- 11) Analisar os dados e verificar a adequação do modelo estatístico;
- 12) Conclusões e recomendações.

Em outras palavras, em um experimento utilizado como teste, são aplicadas mudanças propositalmente às variáveis de entrada do processo ou sistema, trazendo em via de consequência os resultados das mudanças ocorridas nas variáveis de saída, se utilizados todos os procedimentos acima qualificados.

Nota-se que um dos principais objetivos da técnica de projeto por experimentos [22] é a indicação de como uma determinada saída do sistema se comporta em função de mudanças em parâmetros de entrada do processo de fabricação ou no surgimento de variáveis.

No caso em questão, foram utilizadas as seguintes variáveis para obter o resultado requerido:

- 1) subH (altura do substrato);
- 2) subX (tamanho do substrato + plano de terra na direção x);
- 3) subY (tamanho do substrato + plano de terra na direção y);
- 4) Ca (chanfro do elemento radiador da patch);
- 5) Dtriang (chanfro do substrato da patch);
- 6) L (tamanho do elemento radiador da patch);

- 7) feedX (posição do pino de alimentação no eixo x);
- 8) feedY (posição do pino de alimentação no eixo y);
- 9) Coax in rad (raio do pino de alimentação);
- 10) X (variação simultânea para subX e subY);
- 11)  $\epsilon_r$  (constante dielétrica do material do substrato);

Além disso, é importante ressaltar que para melhores resultados, deve-se reunir o maior número de informações sobre as variáveis de entrada, o que trará uma ampla abordagem do tema [47].

Em 1920, criou-se uma abordagem estatística aplicada em pesquisa agrícola, onde se introduziu vários aspectos para o desenvolvimento do DOE, tais como: teste de hipótese, estimativa de parâmetros, planejamento experimental, dentre outros [46].

Atualmente, as técnicas de análise de estatística e o planejamento DOE são amplamente utilizados para estudos de simulação [48, 49, 50].

O estudo e a aplicação das teorias de planejamento experimental e de técnica de otimização para a melhoria de produtos e sistemas são amplamente utilizadas nas áreas da química e engenharia de alimentos, mas na engenharia elétrica sua difusão ainda é pequena, o que gera uma lacuna de conhecimento e uma escassez de técnicas aplicadas ao desenvolvimento de projetos e produtos [51].

Não obstante, mesmo que ainda desconhecida, temos que o projeto de experimentos parece se tratar de uma técnica bastante adequada para a identificação dos parâmetros de maior impacto em um sistema, uma vez que utilizar uma abordagem de “tentativa e erro”, na maioria das vezes, reflete em uma prática bastante dispendiosa e com alto consumo de tempo e energia.

Existem termos comumente usados nas atividades de projeto de experimentos. Fatores são como variáveis experimentais controláveis, nas quais a variação influencia as variáveis de resposta. Cada um dos fatores precisa assumir alguns valores, definidos como níveis. A mudança que estes fatores (variáveis independentes) ocasionam na variável de resposta (variável dependente) indicam o quão forte é o efeito destes fatores.

Outra vantagem do projeto de experimentos [24], é que além da identificação do efeito de cada um dos fatores de forma individual, também se pode determinar os efeitos das interações entre tais elementos, onde o impacto de cada fator depende do nível dos demais fatores envolvidos no processo.

A qualidade de visualização destas interações depende da resolução na qual o projeto de experimentos foi realizado. Uma das maneiras de se obter todas as interações é a formatação

de todas as combinações possíveis entre todos os fatores em todos os níveis. Esta opção é denominada como fatorial completo, que apresenta [25] como vantagem a facilidade de se ter a indicação dos principais fatores com grande confiança, para a variável em estudo.

Porém para a realização do experimento, deve-se definir os fatores a serem testados de uma forma bastante cuidadosa, de maneira a não excluir fatores relevantes e não testar um número muito grande de fatores, uma vez que o número de experimentos a serem realizados é função direta da quantidade de fatores e replicações existentes.

Quando se tem uma grande quantidade de fatores [22], a realização de todas as combinações, ocasiona um grande número de experimentos, tornando-se a realização frequentemente onerosa ou até mesmo impraticável.

Para situações como a descrita acima, ou mesmo em situações onde a realização dos experimentos se torna muito difícil, o uso de experimentos simulados é recomendado. A simulação ajuda diretamente a execução de experimentos onerosos [22] ou até mesmo impossíveis de serem realizados na prática.

Usuários de simulação poderiam obter mais informações de suas análises [27] se estes utilizassem mais teorias estatísticas durante suas análises.

Uma das grandes vantagens em se realizar os experimentos através do uso de um simulador [24], reside no fato de que todos os fatores de entrada são controláveis; isto facilita a gestão e até mesmo o setup dos níveis a serem experimentados. Outra grande vantagem em se realizar os experimentos por meio de simuladores está na possibilidade de se replicar o experimento quantas vezes forem necessárias, o que muitas vezes fica limitado pela questão de custo. Os usuários de modelos computacionais precisam estar atentos para o uso de projeto de experimentos como parte da análise de simulações complexas.

### **5.3 Projeto Fatorial**

A antena objeto de estudo deste trabalho, sofre a influência de dois ou mais fatores sobre a variável de saída simultaneamente. Portanto, o método de variar um dos fatores de cada vez e manter fixo os demais não se mostra adequado quando existe a possibilidade da influência de um fator sobre o outro.

Para este caso, o mais adequado é a utilização de projetos fatoriais ou também conhecido como fatorial completo, pois em cada medida são analisadas as influências cruzadas entre as variáveis de controle.

A análise deve ser feita de maneira que a cada mudança no nível de um fator, a resposta produzida varie proporcionalmente ao peso do fator sobre a análise. Isto é comumente



chamado de efeito principal, porque se refere aos fatores primários de interesse no experimento.

Quando os fatores do projeto são quantitativos, torna-se possível construir a representação de modelo de regressão para o caso de um experimento fatorial como mostra a equação abaixo [47], para dois fatores:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \pm \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon$$

Onde:

y é a variável de resposta, os símbolos  $\beta$  são parâmetros a determinar.

$x_1$  é a variável que representa o fator A.

$x_2$  é a variável que representa o fator B e  $\varepsilon$  é um termo que representa o erro aleatório. O termo  $x_1 x_2$  representa a interação entre  $x_1$  e  $x_2$ .

O procedimento de teste é normalmente resumido num diagrama de análise de variância como mostrado na tabela abaixo. Esta tabela também representa um quadro de saída típico de um programa estatístico como, por exemplo, o software utilizado, MiniTab. A partir dos resultados encontrados na tabela abaixo, calculou-se os efeitos principais de cada fator e o efeito de suas interações.

Através da tabela abaixo, também é possível verificar a influência dos fatores principais, como por exemplo, o fator A (valor de  $\varepsilon$ ) e B (chanfro Ca), assim como a interação entre os fatores ABCDEF, são significativas para um nível de significância  $\alpha$  de 5%. Cabe ressaltar que para efetuar o teste de significância, através do teste t, o MiniTab realiza o calculo utilizando-se do erro experimental e a variância global, comparando-o com o valor crítico[23].

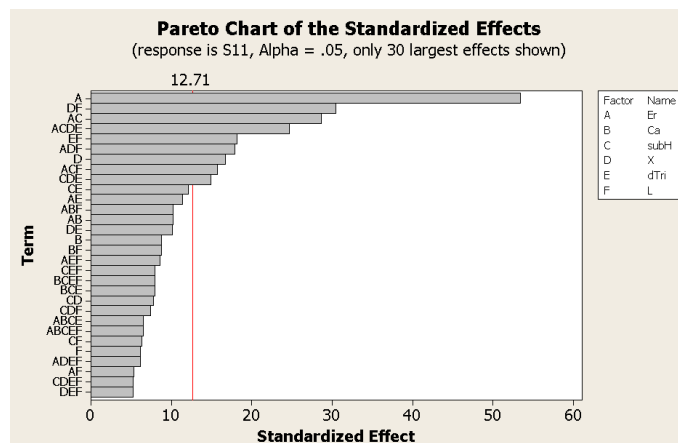


Figura 5: Pareto de análise para determinação da influência dos fatores principais.

Conclui-se através da figura acima que a variável de maior influência na frequência de ressonância da antena é a  $\epsilon_r$ . Este tipo de resposta caracteriza a antena como uma HDA (vide anexo apêndice B).

#### 5.4 Metodologia de Pesquisa

A simulação foi utilizada como metodologia de pesquisa do presente trabalho. Como referência às atividades realizadas utilizou-se a “abordagem de sete passos para condução de um estudo de simulação” [26], conforme apresentado na figura abaixo:

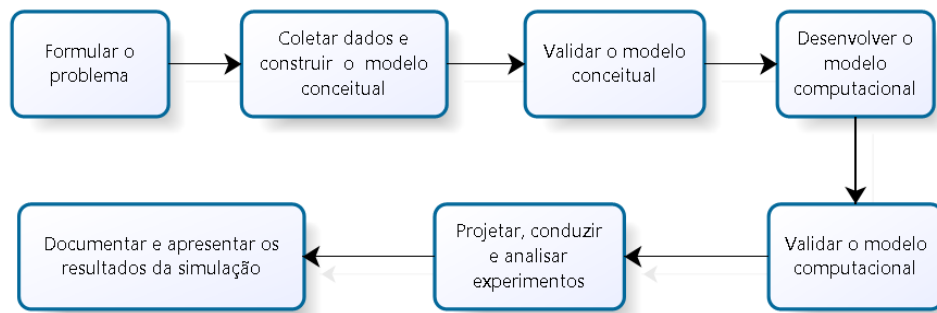


Figura 6: Sete passos para condução de um estudo de simulação.

Fonte: [26] Adaptado de Law (2006).

#### 5.5 Criação do ambiente virtual para análise

A condição de contorno do modelo é parte fundamental na acuracidade dos resultados da simulação.

Para garantir que a condição de contorno criada estava de fato representando a realidade e ajustada de forma a garantir a acuracidade dos resultados, um modelo semelhante ao divulgado no artigo [7] foi criado, validando assim a condição de contorno criada através da acuracidade do sinal de parâmetros como perda por retorno e impedância da antena, uma vez que o modelo da antena apresentado no artigo foi validado em um teste prático. No modelo do artigo, o autor utiliza de uma técnica bastante semelhante à que foi adotada para o aumento da largura de banda no desenvolvimento do conceito da antena final, utilizando slots para ativar ressonâncias nos modos TM01 e TM03 da antena.

O chanfro Ca na antena é determinante na polarização da onda, mas é secundário na segunda ressonância.

O modelo virtual da antena utilizada nas simulações teve como base os mesmos parâmetros baseados na especificação de uma das antenas da empresa Amotech [8], que possui uma grande variedade de antenas para utilização em GPS.

Entretanto, alguns parâmetros como por exemplo as dimensões do elemento radiador não são fornecidas através da especificação. Por este motivo, foi necessário acertar a calibração da frequência de ressonância da antena planar patch, através de interações e variações de algumas variáveis da antena como mostrado na figura abaixo, até que se fosse possível obter resultados próximos aos divulgados na especificação da antena.

Patch antenas são utilizadas pelos sistemas de GPS devido ao seu alto ganho e pequenas dimensões físicas [16]. Ao empregar a técnica DOE, numerosos protótipos virtuais foram simulados no software da Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator) e os resultados de coeficiente de reflexão e impedância de entrada foram obtidos para cada modelo computacional, a fim de investigar o comportamento e a sensibilidade de cada parâmetro físico da antena de GPS.

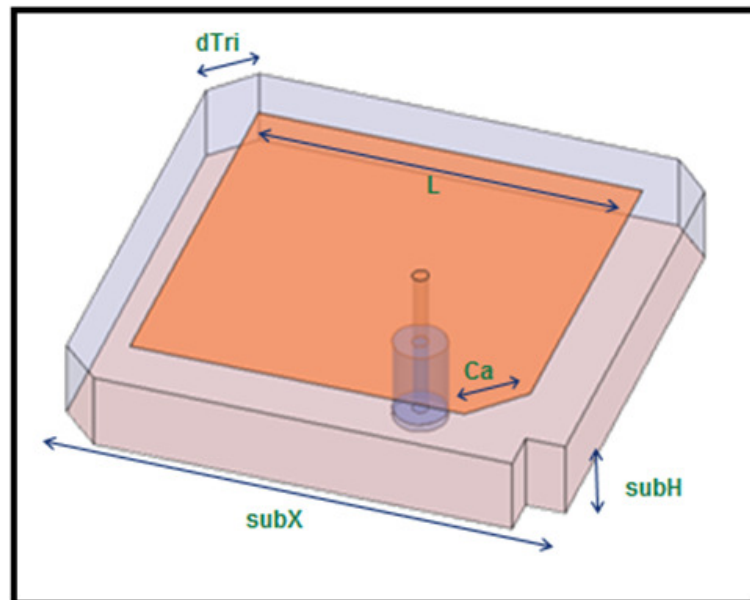


Figura 7: Modelo virtual da Patch antena de GPS desenvolvido para o estudo e suas dimensões (subH=4mm; subX=25mm; subY=25mm; Ca=3.68mm; Dtriang=2mm; feedX=0mm; feedY=2.2mm; Feed\_length=4mm; Coax\_in\_rad=0.4mm; Coax\_out\_rad=1.34mm; L=19.25mm).

Os principais parâmetros buscados através da simulação são:

- $f_0 = 1.575 \text{ MHz}$
- $Z_0 = 50 \Omega$

Além dos parâmetros descritos acima, fatores como o efeito de multipath, maior largura de banda, menores níveis de perda por retorno, ganho e estabilidade do centro de fase também foram analisados para chegar na antena ideal para a simulação e análise necessárias.

Os requisitos de uma antena GPS diferem em várias aplicações, mas um objetivo geral é atingir o coeficiente mínimo de reflexão  $S_{11}$  numa impedância de entrada de referência  $Z_0$  mínimo na frequência de 1.575GHz. Deve também apresentar uma característica de boa polarização circular, a fim de maximizar a recepção da entrada. Como um ponto de partida, foram definidos os primeiros parâmetros do modelo da antena que conforme os procedimentos analíticos descritos abaixo. A largura de uma antena retangular pode ser avaliada através da equação [10]:

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_{reff} + 1}}$$

Onde “W” é a largura da antena [mm], “L” é o comprimento [mm], “ $\Delta L$ ” são os efeitos franjas, “ $\epsilon_{reff}$ ” é a constante dielétrica efetiva, “ $L_e$ ” é o comprimento eficaz [mm] e h é a altura do substrato [mm].

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L$$

Onde  $\Delta L$  e  $\epsilon_{reff}$  são definidos por:

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 3.4\left(\frac{h}{W}\right)}}$$

$$\Delta L = 0.412 \cdot h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3)\left(\frac{W}{h} + 0.26\right)}{(\epsilon_{reff} + 0.258)\left(\frac{W}{h} + 0.8\right)}$$

$$L_e = L + 2\Delta L$$

A frequência de ressonância da antena é obtida através da equação descrita abaixo:

$$F_r = \frac{v_o}{2L\sqrt{\epsilon_{reff}}}$$

Como é possível perceber através do equacionamento acima, fica evidente que a frequência de ressonância da patch é inversamente proporcional ao valor da raiz de  $\epsilon_r$  [12].

Características como a espessura do substrato, conforme mostrado na figura 5, foram adicionados à antena a fim de melhorar o coeficiente de reflexão e impedância de entrada da antena planar patch.

Um chanfro na antena é determinante na polarização circular da onda, mas é secundário na segunda ressonância.

Após determinado o valor teórico para todas as variáveis e tamanhos da antena, um DOE (Design Of Experiments) com as variáveis parametrizadas da antena plana patch foi conduzido para se obter quais os parâmetros influenciavam mais nas respostas em frequência da antena planar patch. Como é possível perceber, na figura abaixo, o parâmetro L é o parâmetro de maior influência na frequência de ressonância da antena planar patch otimizada.

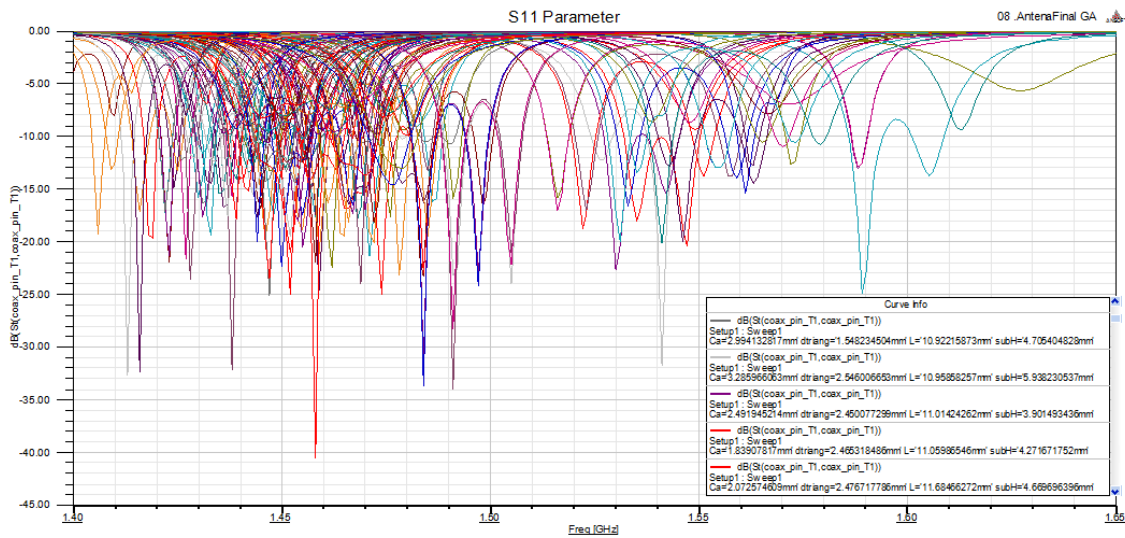


Figura 8: Perda por retorno da antena planar patch - Otimização do design da antena planar patch - DOE (Design Of Experiments com 700 simulações).

Após a otimização feita por variações aleatórias das variáveis, ficou evidente que a maior parte dos resultados das simulações não atendeu o objetivo para a frequência desejada.

Para atingir o ponto ideal da antena, foi criada então uma simulação variando apenas as variáveis que são mais influentes na resposta da antena (L, Ca e dTri).

Abaixo o gráfico demonstra as 700 simulações necessárias até que a melhor relação de largura de banda x resposta em frequência foi obtida. Na etapa de resultados a seguir é possível visualizar o gráfico de resposta em frequência da antena otimizada.

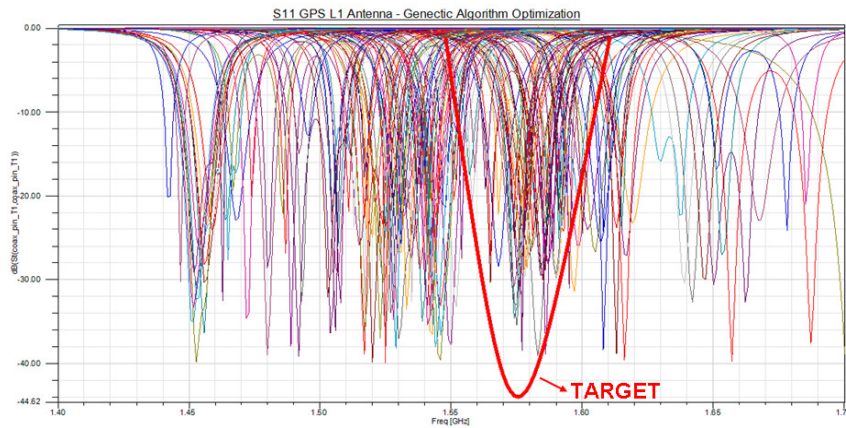


Figura 9: Perda por retorno da antena planar patch - Resultados obtidos por Algoritmo Genético para os valores próximos da frequência de 1,575GHz.

A figura acima mostra a variação parametrizada das variáveis (L, Ca e dTri) dispostas para a otimização da antena através da utilização de um algoritmo genético, ferramenta disponível no software HFSS (High Frequency Structure Simulator).

O algoritmo genético foi utilizado com a finalidade de se obter os melhores resultados em relação à impedância da antena, S11 mínimo e maior largura de banda. Códigos de algoritmo genético são parte de uma classe de técnicas de otimização chamada otimizadores estocásticos.

Por outro lado, o otimizador por algoritmo genético irá executar muitas repetições e pode se tornar muito lento. A pesquisa feita pelo algoritmo genético é um processo iterativo que atravessa diversas gerações.

O algoritmo genético usa um tipo de seleção aleatória e aplicada de forma estruturada [17]. A seleção automática das variáveis para avançar para a próxima geração tem que atender a um custo mínimo ajustado de valores requeridos e então o primeiro setup de validação é gerado e quando concluído os resultados passam por uma avaliação com os pré-requisitos ajustados e requeridos.

Em cada geração, alguns novos setups de simulação são gerados, partindo dos melhores resultados obtidos na camada anterior de simulação e descartando os piores resultados. É assim criada uma nova população parametrizada em um processo de seleção natural, onde as variáveis são reajustadas e então novamente é testado para verificar se os resultados obtidos atendem ao objetivo ajusta. Um processo iterativo começa a selecionar os indivíduos e completa o conjunto resultante, até que as dimensões finais de antena passam a ser escolhidas.

O gráfico abaixo mostra os resultados para  $S_{11}$  e impedância de entrada para todas as 700 simulações geradas pela otimização por algoritmo genético detalhando o melhor design, que por sua vez, apresenta uma  $S_{11}$  inferior a 22dB e impedância de entrada de  $50\Omega$  em 1.575GHz.

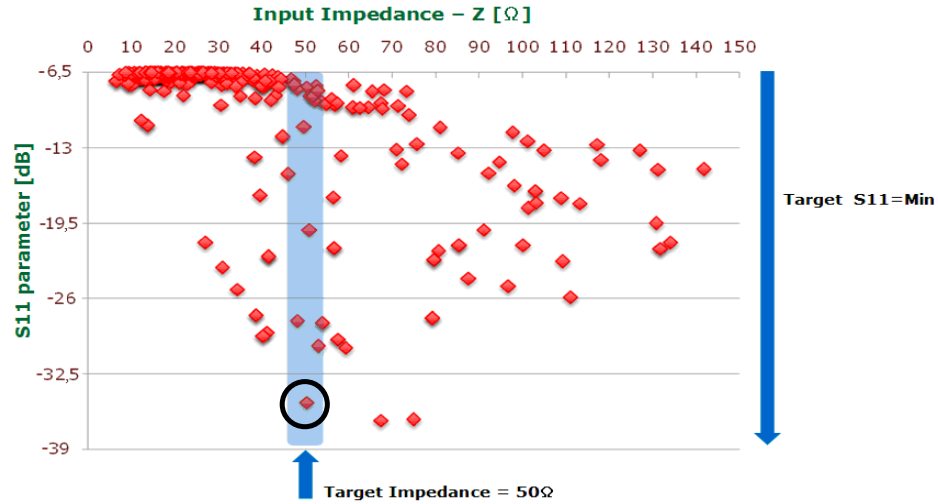


Figura 10: Impedância  $Z$  [ $\Omega$ ] e o parâmetro  $S_{11}$  [dB], referido à frequência  $f_0$ , da antena planar patch, para todas as simulações otimizadas em 1,575GHz.

Conforme descrito na literatura [4], o desempenho do sistema de GPS será muito melhor quando a antena de GPS estiver localizada sobre um grande plano de terra, com vista livre do céu, garantindo uma linha de visão direta de todos os satélites. A partir dessa ideia, a fonte de campo próximo foi adicionada no ponto ideal para seu funcionamento (teto do veículo), para que se fosse possível ter uma comparação com o caso ideal de utilização da antena.

Como a antena em questão possui elementos muito reduzidos como feed de alimentação e em comparação ao tamanho do modelo do veículo isso representa uma dificuldade para o processo de validação do software HFSS pois no processo de cálculo de malhas para cálculos de elementos finitos, o software precisa refinar a malha excessivamente para obter resultados razoáveis de sua análise.

Por esse motivo, e por se tratar de uma estrutura de análise razoavelmente grande, algumas ferramentas do software HFSS foram utilizadas, para reduzir o tempo de processamento.

Foram utilizados os parâmetros de radiação da antena otimizada, criando assim uma fonte de Campo Próximo utilizando a ferramenta de importação de parâmetros de radiação e de intensidade disponível no software HFSS como é possível reparar na figura abaixo:

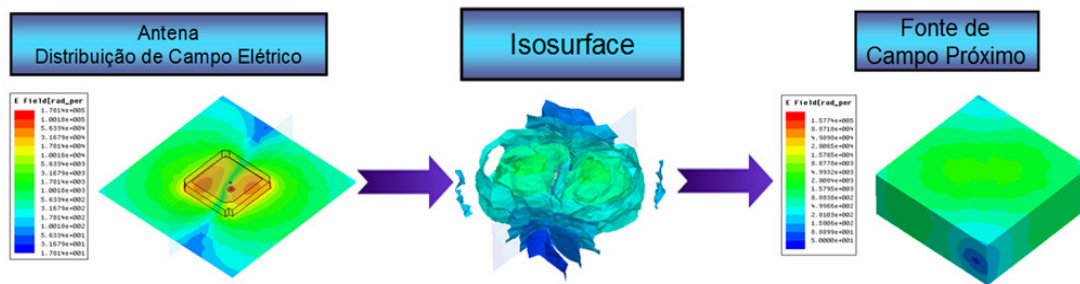


Figura 11: Simplificação da antena (Fonte de Campo Próximo) para simplificação do modelo e aceleração do tempo de processamento da simulação.

A figura acima representa uma fonte de Campo Próximo que possui exatamente as mesmas características do modelo da antena otimizada, no entanto, sem os detalhes milimétricos da antena que não influenciam os resultados finais da análise.

Este modelo de fonte de Campo Próximo será utilizado e detalhado melhor à seguir no capítulo de resultados onde o modelo foi implementado junto à carroceria metálica do veículo para a realização de análises de influência da carroceria metálica.

Entretanto esta ainda não representa a condição ideal para a utilização desta antena no veículo, pois a principal ideia é garantir que o sistema não seja facilmente burlado. A integração do sistema de rastreamento com a eletrônica embarcada do veículo traz por sua vez um atrativo bastante interessante para este requisito. Isso por questões de segurança de funcionamento do sistema, uma vez que com a antena exposta, o sistema fica muito vulnerável à ações de bandidos que podem facilmente danificar o sistema de posicionamento do veículo.

Com base em pesquisa de mercado realizada perante os principais clientes das montadoras de veículos do Brasil, alguns fatores foram pontuados e apontados como principais para se obter resultados sobre a expectativa de mercado para a função de rastreamento em veículos.

A tabela II representa um resumo da pesquisa, e os principais fatores de seleção de um conceito para a integração do sistema:



Tabela III: Pesquisa com clientes - Fatores que influenciam na seleção de um conceito para a integração do sistema de rastreamento na arquitetura eletroeletrônica do veículo.

<b>Voz do cliente</b>	<b>Percentual de relevância</b>
Atender às exigências legais (resoluções)	14.29%
Confiabilidade	13.19%
Atender ao cronograma de desenvolvimento	12.09%
Dificuldade em burlar o sistema	10.99%
Redução de custo (arquitetura eletroeletrônica)	9.89%
Redução de custo (produto)	8.79%
Escalabilidade	7.69%
Facilidade de instalação	6.59%
Facilidade de manutenção	4.40%
Modularidade	4.40%
Integração na arquitetura eletroeletrônica	4.40%
Conceito inovador	2.20%
Expansão de recursos (novos recursos agregados)	1.10%

Como é possível perceber através da tabela acima mostrada, os principais itens apontados pelos clientes envolve o atendimento de exigências legais, confiabilidade, dificuldade em burlar o sistema e redução de custos na arquitetura eletrônica do veículo.

O design da antena de recepção do sistema de GPS é um dos fatores mais importantes em face de que um bom processo de design da antena garante uma maior confiabilidade na recepção de sinais de vários satélites e a rejeição do efeito de multi-percurso [14].

A integração do sistema de rastreamento do veículo na arquitetura eletroeletrônica do painel de instrumentos, por sua vez trás ganhos consideráveis não somente como redução de custo de material do módulo de rastreamento, pois o micro controlador e outros componentes podem ser reaproveitados do sistema utilizado para a integração e também aumenta a dificuldade de burlar o sistema e nem prejudicam o fator de confiabilidade do mesmo.

O principal conceito adotado nesta dissertação é o caso de uma antena localizada no painel de instrumentos do veículo.

Para gerar um ambiente representativo, foi necessário a duplicação da antena, onde uma das antenas representa a antena receptora do sinal GPS (Rx) localizada no painel de instrumentos do veículo e a outra antena em campo distante representa o sinal de transmissão do satélite (Tx). Essa aproximação é válida uma vez que como descrito pela literatura [9], de acordo com a relação de reciprocidade, a antena possui o mesmo diagrama transmitindo ou recebendo.

Para representar o ambiente hostil de uma antena localizada no painel de instrumentos do veículo, o modelo do veículo adotado como base para os estudos virtuais, foi devidamente simplificado.

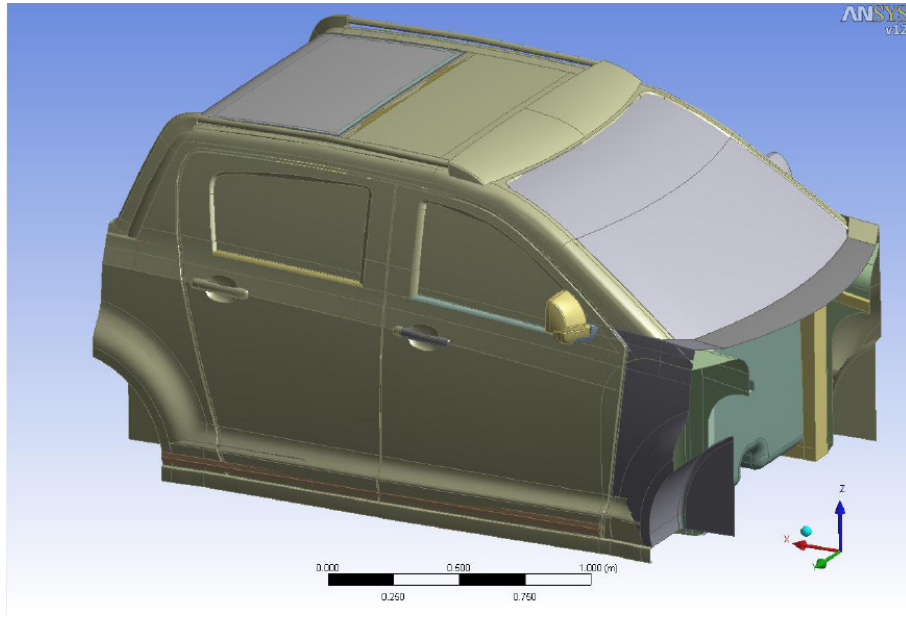


Figura 12: Modelo do veículo adotado como base para os estudos virtuais.

O modelo acima mostrado foi simplificado com a finalidade de diminuir o tempo de processamento da simulação sem afetar os seus resultados finais. Peças como o vidro do veículo e a porta traseira foram removidos do modelo simplificado.

Levando em consideração fatores como o ângulo do vidro, que influenciam de maneira significativa o funcionamento da antena no veículo. Conforme mostrado na figura abaixo, o modelo foi então parametrizado para uma variação do ângulo do vidro de 30° até 90° o que determina o ângulo do vidro mais crítico para uma antena localizada no painel de instrumentos do veículo.

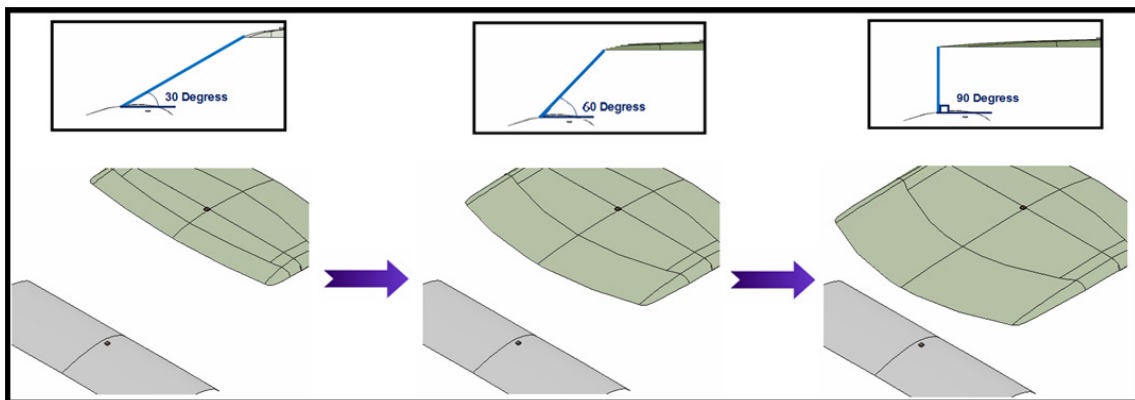


Figura 13: Modelo do para-brisa parametrizado com variação de 30° até 90°. O ângulo maior impõe restrições para a qualidade do sinal recebido pela antena localizada no painel de instrumentos do veículo.

Quando a antena está localizada nas laterais do painel de instrumentos do veículo, a antena radia para o centro do veículo sendo o sinal atenuado pelas peças de metal da porta. Quando variamos o ângulo do para-brisa através do artifício da simulação, é razoável supor que, quando colocado no centro do painel de instrumentos, o padrão de radiação da antena não vai ser afetado pelas partes metálicas das portas, assim, essa parte pode ser retirado da simulação a fim de acelerar o processo computacional.

Vê-se que o vidro, por sua vez, representa uma influência muito pequena na qualidade do sinal de GPS e por este motivo também foi removida do modelo virtual. Para garantir que a influência do vidro do veículo pode mesmo ser removido do modelo, um GPS da marca TOM-TOM foi utilizado para medir a variação na intensidade do sinal quando localizado dentro do veículo (influência do vidro) e quando colocado na mesma posição de fixação fora do veículo (sem a influência do vidro).

A figura abaixo mostra detalhes do teste realizado para validar a baixa influência do sinal de recepção da antena quando o GPS é colocado do lado de dentro e do lado de fora do veículo.



Figura 14: GPS TOM-TOM modelo XL utilizado para medir a variação na intensidade do sinal quando localizado dentro do veículo (influência do vidro) e quando colocado na mesma posição de fixação fora do veículo (sem a influência do vidro).

Como é possível perceber, menos de 20% do sinal foi atenuado pelo vidro, uma vez que o GPS utilizado para o teste possui uma escala com 5 barras para representar a variação de

intensidade de sinal, e em ambos os casos a intensidade se manteve inalterada pela presença do vidro.

## 6 Resultados

Para o desenvolvimento da simulação utilizada para comprovar a influência das paredes metálicas no correto funcionamento das antenas de GPS do sistema de rastreamento, foram necessários o desenvolvimento de alguns modelos. A função de um modelo é descrever o funcionamento da realidade através de um pequeno número de variáveis que permita a sua conversão e análise para que desta maneira seja possível determinar os parâmetros mais influentes.

Para o desenvolvimento das simulações, foi adotado como ferramenta o software HFSS (High Frequency Structure Simulator) da Ansoft.

Como primeira etapa de desenvolvimento, foi adotado o modelo de uma Patch antena capacitiva cerâmica convencional, geralmente utilizada pelas montadoras de automóveis ajustada para um bom funcionamento com o menor valor de  $S_{11}$ .

A relação de espessura do substrato é muito importante, pois ela tem uma relação direta com a largura de banda da antena [11].

Para compensar este efeito, um substrato com constante dielétrica de  $\epsilon_r = 20$  [8] foi adotado sendo possível aumentar a espessura do substrato de forma a diminuir as reatâncias indutivas propiciadas pela proximidade da antena com as paredes metálicas do veículo.

Vê-se que os valores de  $\epsilon_r$  adotado garantem por sua vez um uma redução considerável no tamanho da antena [10], possibilitando a inclusão da antena no módulo de rastreamento do veículo. O chanfrado no modelo da antena também aumenta por sua vez a eficiência e largura de banda da antena [11]. Os parâmetros ( $C_a$  e  $d_{Tri}$ ) apresentados nos modelos da figura 1, são os parâmetros de maior influência na largura de banda.

O gráfico de perda por retorno abaixo mostra os resultados obtidos através da simulação desenvolvida com da antena otimizada.

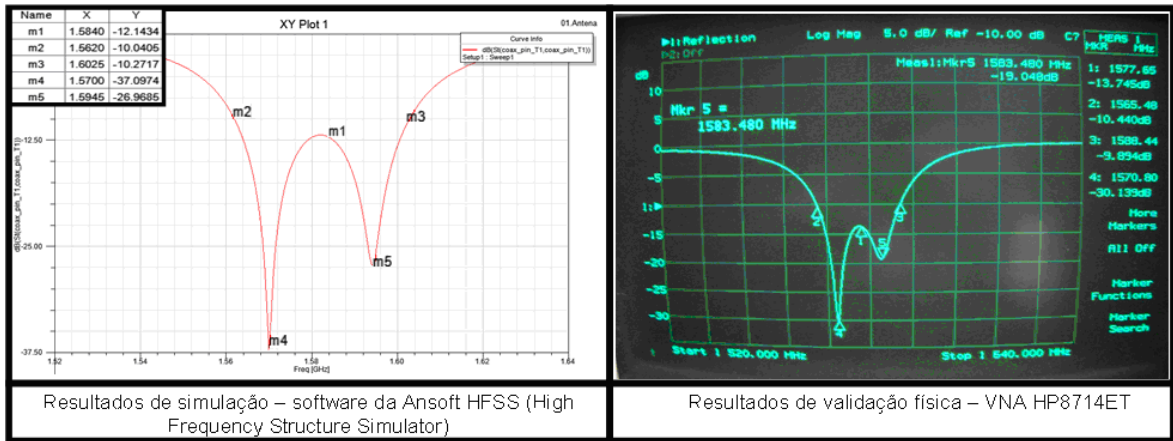


Figura 15: Gráfico de perda por retorno – Simulação e Validação Física – Resultado obtido para a antena otimizada.

A largura de banda seguindo a relação de 2:1 (valores referenciados em -10db de perda por retorno) apresenta 40 MHz de largura de banda, com valores de pico de S11 de -37,5dB, o que representa valores consideráveis para a frequência desejada e bem próximas dos valores obtidos na validação física da antena.

Geralmente, o fator Q de um ressonador [38] é definido como a relação entre a energia armazenada pela energia dissipada por ciclo. Para uma antena cerâmica, a energia dissipada é a soma da potência radiada  $P_{rad}$ , a potência dissipada pela parte metálica (impedância)  $P_{cond}$  e a potência dissipada devido a perdas no dielétrico do material cerâmico  $P_{diel}$ .

A relação de largura de banda está diretamente ligada ao fator Q da antena, através da seguinte relação:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

O grau de desvio entre a impedância da carga ligada à linha de transmissão e a impedância característica da linha de transmissão é demonstrado através do gráfico abaixo onde um índice de VSWR (voltage standing wave ratio) é apresentado. Obedecendo à relação de 2:1, este gráfico determina a qualidade do casamento de impedância entre a antena e linha de transmissão.

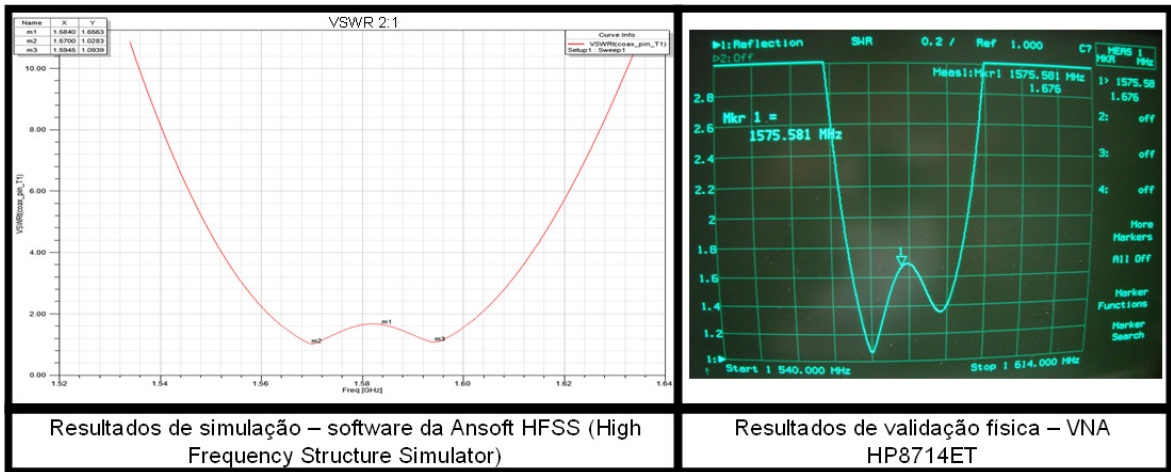


Figura 16: Gráfico de VSWR – Simulação e Validação Física – Resultado obtido para a antena otimizada.

A carta de smith apresentada abaixo demonstra o casamento de impedância da antena em  $50 \Omega$  (onde seus eixos representam a Impedância Capacitiva x Impedância indutiva) [13]. O perfeito casamento de impedância entre a antena e dispositivos do módulo como por exemplo circuitos de LNA (Low Noise Amplifier) é muito importante para evitar perdas excessivas por reflexão de sinais. O valor 1 na abscissa da carta de smith representa uma impedância  $Z=(50 + 0j)\Omega$  e a volta feita pelo gráfico em torno do valor de  $VSWR = 1$  representa o aumento na largura de banda da antena aumentando assim a sua eficiência à fatores de deslocamento na frequência de ressonância da antena.

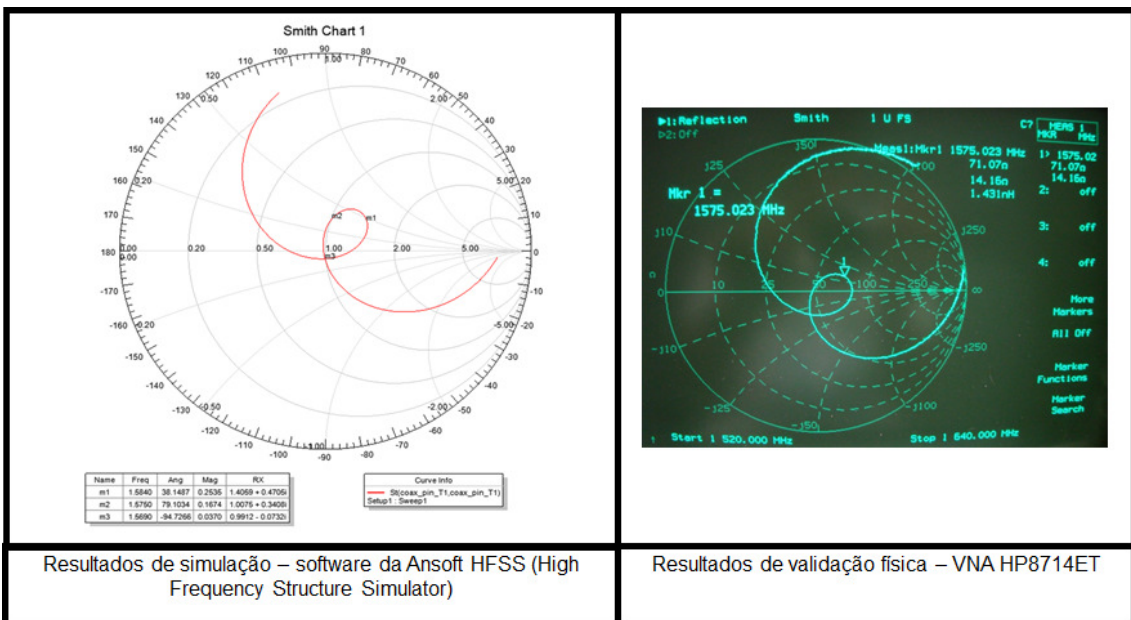


Figura 17: Smith Chart – Simulação e Validação Física – Resultado obtido para a antena otimizada.



Todas as simulações e estudos numéricos considerados neste trabalho baseiam-se no princípio de que quando a antena é colocada sobre um plano de terra (teto do veículo), é obtida a condição ideal para o funcionamento desta e então se faz possível uma análise entre o suposto lugar ideal e o lugar proposto para o estudo (painel de instrumentos).

No entanto, no teto do veículo real são encontradas algumas irregularidade nas geometrias. Entretanto, para se representar no ambiente virtual tais imperfeições e dessa maneira fazer uma representação exatamente perfeita é praticamente inviável porque o modelo real possui muitos detalhes.

Então podemos considerar que o teto do veículo é um plano de terra perfeito, sendo suficientemente grande para o padrão de radiação não ser afetado, e assim detalhes da carroceria podem ser eliminados criando um ambiente ideal para se fazer uma análise.

Além disso, se a antena está colocada perto da borda do teto do veículo, o padrão de radiação será afetado. Este efeito é mostrado na figura à seguir:

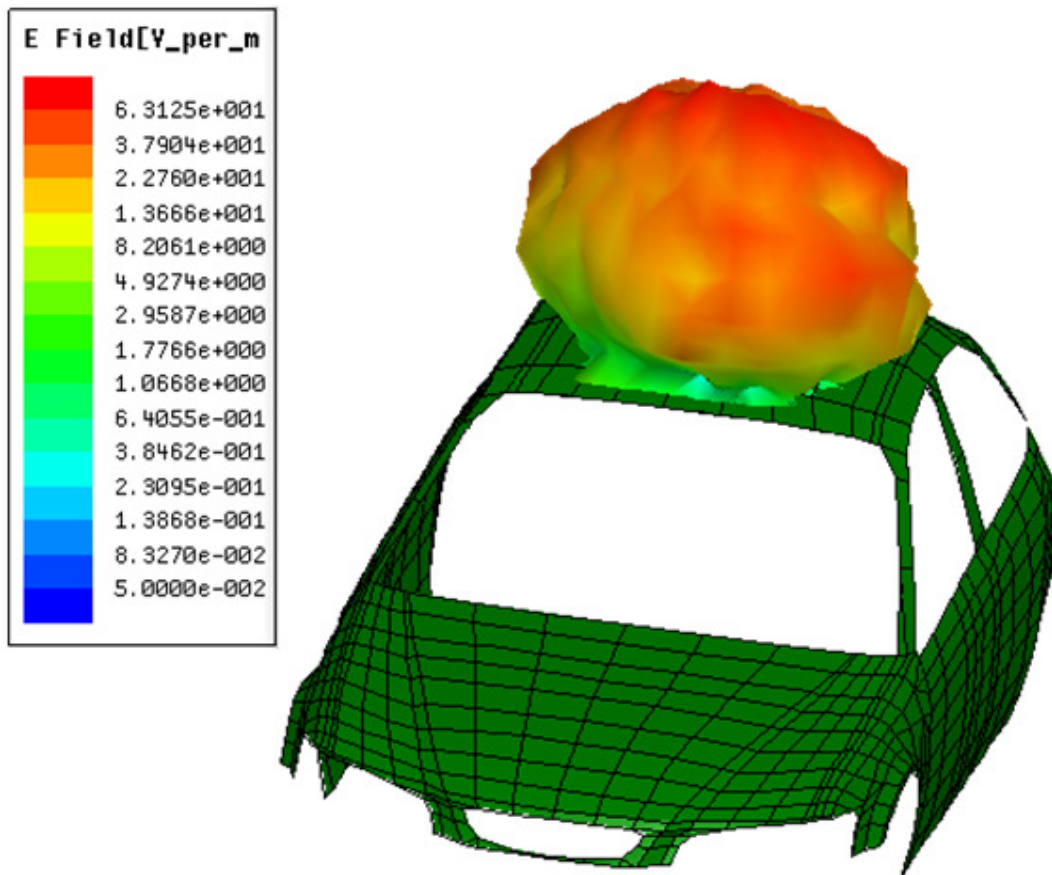


Figura 18: Diagrama de radiação da antena localizada no ponto ideal para seu funcionamento (Teto do veículo).

A distância entre a borda do teto do veículos podem ser medida como um valor referida ao comprimento de onda operacional.

Além disso, os lóbulos lateral e traseiro da antena passam à aumentar devido à ausência de o plano de terra nesta região. Por isso, a antena patch irá apresentar uma redução no desempenho quando ela é colocada próximo à borda do teto do veículo.

A fonte excitadora no simulador pode ser ajustada para os valores mais próximos da realidade que são  $9,1 \mu\text{V/m}$  [56], no entanto, como os valores gerados por esta etapa da simulação formam a figura para o ponto ideal de localização da antena, foram adotados os mesmos padrões de valores elevados que foram considerados nas demais etapas de simulação deste trabalho para adequar os níveis de comparação.

Na figura abaixo, como podemos perceber, no primeiro caso temos um ângulo de apenas  $30^\circ$  entre o vidro e o painel de instrumentos do veículo, o que representa o melhor caso para antena que está localizada no painel de instrumentos. No entanto, se repararmos na antena localizada no teto do veículo, podemos perceber a existência de manchas verdes no diagrama de radiação.

Isso significa que parte da radiação da antena está sendo direcionada para baixo, no sentido contrário do ideal.

Quando a antena é colocada perto das bordas, a frequência de ressonância é ligeiramente afetada e uma redução na eficiência da antena pode ser observada.

Quando a antena está localizada à aproximadamente 30 milímetros da borda do teto do veículo, o padrão de diretividade de radiação da antena apresenta uma redução significativa em seu valor de potência.

Por outro lado, a antena no painel de instrumentos, recebe todo o campo elétrico incidente.



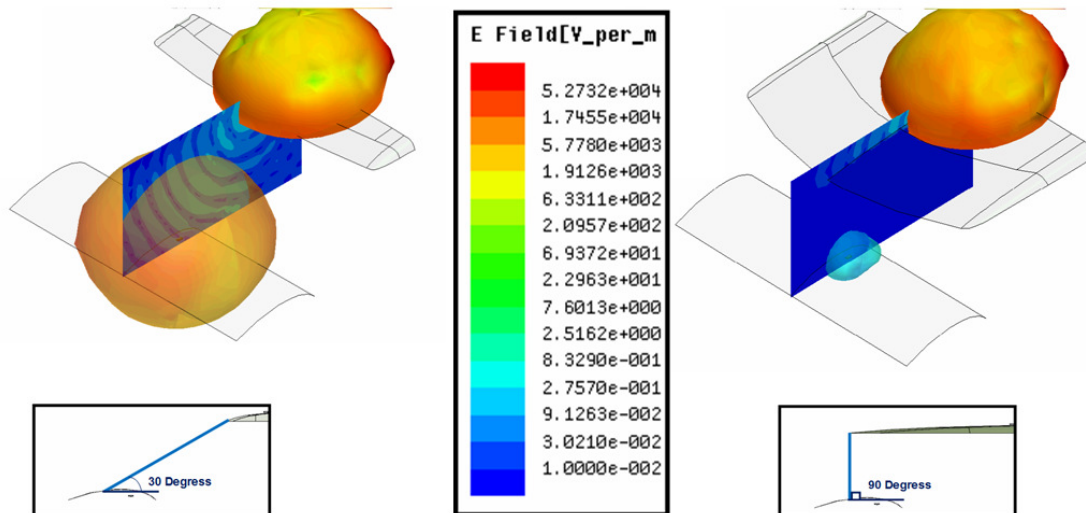


Figura 19: Variação da intensidade de campo-elétrico com a variação do ângulo do vidro.

Na figura acima, como podemos perceber, no segundo caso temos um ângulo de 90° entre o vidro e o painel de instrumentos do veículo.

Receptores GPS [56] podem ser testados com simuladores de satélite geradores de sinal. Estes simuladores são caros, mas se forem disponíveis proporcionam um ambiente controlado e permitem medições precisas, particularmente em termos de limite de sinal para aquisição de dados.

No artigo [56] o autor determina através de experimentos físicos e através de uma ferramenta de apoio desenvolvida em Microsoft Excel, a densidade do fluxo nominal para um GPS de sinal C/A na superfície da Terra é 0,22  $\rho\text{W}/\text{m}^2$  (ou um campo elétrico de 9,1  $\mu\text{V}/\text{m}$ ). A área efetiva de uma antena GPS hemisférica (3dBi) circularmente polarizada irá captar com sinal de -119dBm de potência de RF, que é equivalente a -122 dBm em sua superfície.

A antena fonte radiadora, por conta da proximidade da fonte de campo elétrico os níveis em V/m são muito altos devido ao set-up do simulador (fonte) o que indica que conforme mostrado pelo autor no artigo acima, os efeitos da distância estão sendo propositalmente anulados para mostrar que independente da intensidade do sinal imposto, a carroceria metálica do veículo ainda atenua o sinal à níveis críticos.

Para a antena localizada no teto do veículo, toda a parcela de radiação do campo elétrico esta sendo direcionada para cima enquanto que para a antena localizada no painel de instrumentos do veículo sua eficiência é bastante prejudicada pela presença da cobertura metálica do teto do veículo chegando à níveis que impossibilitam a utilização de uma tecnologia como a GPS.

Na figura abaixo é possível perceber de forma mais detalhada as variações de intensidade de campo elétrico para diversos ângulos do vidro do veículo, mostrando de forma clara a redução

do campo elétrico, para uma angulação do vidro do veículo a partir de  $60^\circ$ , ângulo este que pode ser adotado como limite para o uso de uma antena GPS no painel de instrumentos do veículo.

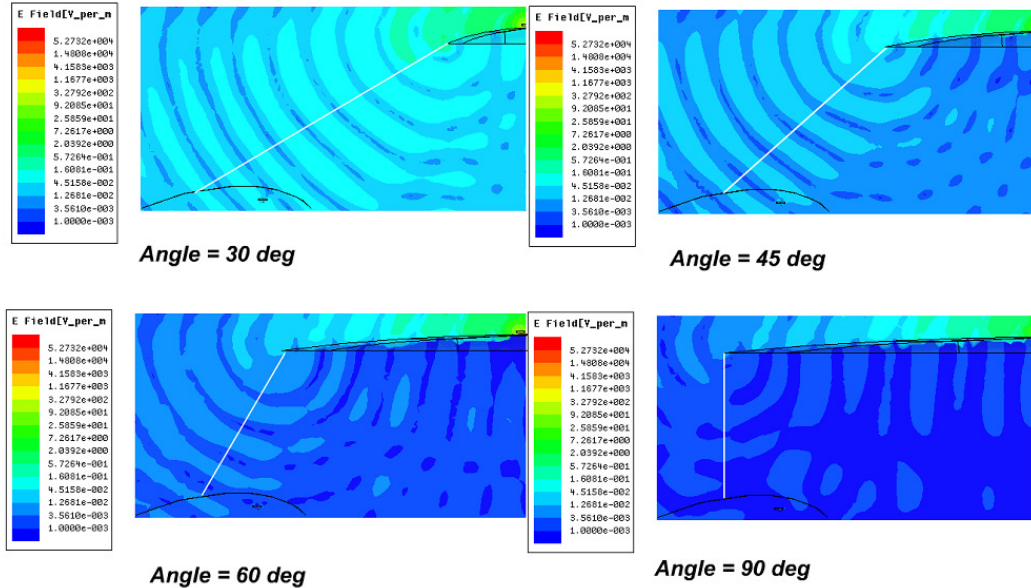


Figura 20: Variação na distribuição das linhas de campo-elétrico com o incremento do ângulo do vidro.

Para obter-se uma análise pontual do problema, uma fonte de campo próximo foi colocada acima da carroceria do veículo e sinais de intensidade de campo elétrico foram medidos pela antena posicionada no painel de instrumentos do veículo.

Com o modelo já parametrizado, foi efetuada um varredura de valores de intensidade de campo iniciando em  $30^\circ$  e finalizando em  $90^\circ$  possibilitando assim uma verificação do ponto crítico  $60^\circ$ .

## 7 Discussão

Após uma profunda análise efetuada nas literaturas disponíveis e através de mídias de comunicação como fóruns de discussões sobre o assunto [4,5,6], concluiu-se que não existe ainda uma análise sólida representativa dos efeitos sofridos por uma antena localizada no painel de instrumentos do veículo, mostrando através de medições de intensidade de campo elétrico a influência da carroceria metálica do veículo na recepção do sinal.

A crescente utilização da aplicação empregando GPS e o custo cada vez menor de seus componentes levam a crer que os sistemas de rastreamento veicular através da tecnologia de GPS se tornarão um importante diferencial competitivo e obrigatório na indústria automotiva [2].

Temos que considerar fatores limitantes para a aplicação desta tecnologia, uma vez que como um item de série em todos os veículos de produção conforme imposto pela resolução número 245 do Denatran, fatores como a inclinação do vidro podem criar uma blindagem eletromagnética para a antena localizada no painel de instrumento do veículo ou até mesmo a proximidade da antena de recepção de sinais GPS das paredes metálicas como portas e assoalho podem interferir em decisões como a localização da aplicação do módulo de rastreamento no veículo, conforme detalhado acima neste trabalho.

O conceito utilizado pelas montadoras hoje, de adotar uma localização padrão para o módulo de rastreamento do veículo, deve ser reconsiderado de acordo com o design externo da carroceria metálica do veículo em relação ao painel de instrumentos.

O caso de estudo desse trabalho baseia-se em uma antena localizada no painel de instrumentos do veículo uma vez que esta localização vem sendo utilizada como padrão pelas montadoras de veículos no Brasil.

No entanto, após uma análise detalhada os resultados obtidos através deste trabalho, fica claro que a posição ideal para a localização de uma antena de GPS em uma arquitetura veicular é definitivamente o teto do veículo.

Apesar de ser óbvio que à medida que o ângulo do para-brisa aumenta a carroceria do carro se amplia dificultando a recepção, esta afirmação foi comprovada com simulações. Em arquiteturas nas quais o ângulo entre o painel de instrumentos e o vidro dianteiro do veículo são maiores que 60°, não é razoável a instalação de um módulo de rastreamento do veículo no painel de instrumentos.

## 8 Conclusões

Nesta dissertação, uma antena disponível comercialmente foi modelada em ambiente virtual e caracterizada para aplicações da tecnologia GPS na faixa de frequência  $f_0 = 1.575$  MHz visando à realização de uma análise efetiva da influência da carroceria metálica do veículo na recepção do sinal proveniente de um satélite do sistema de GPS para aplicação em sistemas de rastreamento veicular.

A antena virtual apresentou resultados bastante consistentes conforme mostrado em detalhes ao longo da apresentação deste trabalho. Isso significa que o ambiente virtual utilizado é confiável.

A utilização do software HFSS (High Frequency Structure Simulator) viabilizou a criação de um ambiente virtual no qual a cobertura metálica do teto do veículo pode ser variada e assim uma análise sobre os efeitos dessa variação foi efetuada, uma vez que a realização de um experimento prático torna-se inviável.

Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios e bastante representativos, mostrando a variação sofrida na recepção de sinal de uma antena GPS localizada no painel do veículo para uma variação no ângulo do veículo entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$ .

O modelo da antena também foi adicionado ao teto de um veículo restilizado para que a medida fosse utilizada como referência uma vez que o teto do veículo representa a posição ideal para a aplicação da tecnologia de GPS.

Os resultados obtidos mostram que para uma antena localizada no painel de instrumentos de um veículo, os níveis de sinais de recepção sofre grande defasagem e redução da intensidade do sinal o que representa uma grande dificuldade de projeto que deve ser considerada desde a fase inicial de projetos de aplicação de sistemas eletrônicos pelas empresas do setor automotivo.

Para veículos onde a inclinação do vidro dianteiro posiciona a carroceria metálica do teto do veículo acima da antena de recepção de sinal GPS, dificuldade com relação à intensidade do sinal recebido pode ser um limitante na aplicação da tecnologia no veículo.

Como resultado gerado pelo trabalho apresentado, foi obtido uma angulação crítica para o vidro dianteiro do veículo de  $60^\circ$ , valor este medido entre o painel de instrumentos do veículo e o vidro dianteiro.

Muitos tópicos abordados brevemente neste trabalho podem ser desenvolvidos mais detalhadamente devido a sua importância, principalmente na caracterização do ambiente espacial onde os sinais de GPS são disponibilizados pelos satélites. Tais assuntos poderão ser abordados em trabalhos futuros.

## Referências

---

1. Diário de S.Paulo. Gabriel Batista. *Carro zero deixará lojas com rastreador em 2009*. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/pais/mat/2007/08/02/297082223.asp>>. Acesso em 23.06.2010.
2. Resolução do DENATRAN. Resolução Nº. 245. SãoPaulo: 27 DE JULHO DE 2007.
3. UOL Auto notícias. JM. *Conversa eletrônica entre carros pode aumentar segurança*. Disponível em: <<http://autoestrada.uol.com.br/interno.cfm?id=950>>. Acesso em 23.06.2010.
4. Yingcheng Dai, Tim Talty, Leo Lanctot (2001). *GPS antenna selection and placement for optimum automotive performance*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. **01**: 132 - 135.
5. Gregory T. French (1996). *Understanding the GPS: An Introduction to the Global Positioning System*. GEO Research.
6. Eric Abbott, David Powell (1999). *Land-vehicle navigation using GPS*. Proceedings of the IEEE vol. **87**: 145.
7. M. Elsdon, A. Sambell, S.C. Gao (2003). *Inset microstrip-line fed dual frequency microstrip patch antenna*. Antennas and Propagation, 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491) vol. **01**: 28 - 33.
8. Empresa Amotech datasheet. *Amotech Ceramic Patch Antena Specification – Part Nº G25-4E08843-D120 / Model Nº 2803738*. Revisão B: 20.05.2008.
9. Le-Wei Li, Ya-Nan Li, Juan R. Mosig (2008). *Design of a Novel Rectangular Patch Antenna with Planar Metamaterial Patterned Substrate*. Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2008. iWAT 2008: 123.
10. C.A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, New York 1997 - 2nd edition.
11. Chih-Yu Huang, Ming-Han Lin (2000). *Ceramic GPS Antenna for Remote Sensing*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International vol. **05**: 2182.
12. Aaron K. Shackelford, Kai-Fong Lee, K. M. Luk (2003). *Design of Small-Size Wide-Bandwidth Microstrip-Patch Antennas*. IEEE Antennas and Propagation Magazine vol. **45**, Issue: 1.
13. Maxim Inovation Delivered (2002). *Impedance Matching and the Smith Chart: The Fundamentals*. <<http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/742>>. Acessado em 02.07.2010.
14. Neus Padros, Juan I. Ortigosa, James Baker, Magdy F. Iskander (1996). *Comparative Study of High-Performance GPS Receiving Antenna Designs*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium vol. **03**:1958 - 1961.
15. M. Diaz (1999). *Integrating GPS Receivers into Consumer Mobile Electronics*. IEEE Multimedia, vol. **06**: 88-90.
16. Y. Qian et al. (1999). *Microstrip patch antennas using novel PBG structures*. Microwave Journal, vol. 42, p 66-76.
17. Joshua Knowles (2005). *A summary-attainment-surface plotting method for visualizing the performance of stochastic multiobjective optimizers*. Intelligent Systems Design and Applications, 2005. ISDA '05. Proceedings. 5th International Conference: 552 - 560.

- 
18. Agilent HP8714ET. *Manual de utilização HP8714ET*. <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/08712-90056.pdf>>. Acessado em 13.08.2010.
  19. MRC componentes. Amotech GPS patches antennas 25mm X 25mm. <<http://www.mrccomponents.de/amotech.htm#pdf/YDRA-A25-1575.pdf>>. Acessado em 13.08.2010.
  20. John D. Kraus (1983). *Antenas*. 2nd edition. Guanabara Dois.
  21. Montgomery, D.C. (2001). *Design and Analysis of Experiments*. 5th edition, John Wiley & Sons, Inc.
  22. KELTON, W.D. (1999). *Designing simulation experiments*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference.
  23. Mason, R.L., Gunst, R.F., HESS, J.L.(2003). *Statistical Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Publication.
  24. Montevechi, J.A.B., Pinho, A.F., Leal, F., Marins, F.A.S. (2007). *Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry*. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference.
  25. Cox, D.R., Reid, N. (2000). *The Theory of the Design of Experiments*. Chapman & Hall/CRC.
  26. Law, A.M. (2006). *How to build valid and credible simulation models*. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference.
  27. Kleijnen, J.P.C., Sanchez, S.M., Lucas, T.W., Cioppa, T.M.(2005). *State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments*. Journal on Computing, vol. 17, n.3, p. 263–289.
  28. Joseph S. Colburn (1999). *Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates* – IEEE Antennas and Propagation vol. **47**: 1785 - 1790.
  29. Antenanova (2008). *It's the antenna that makes it wireless*. HDA Custom Antennas. <<http://www.antenova.com/?id=924>>. Acessado em 02.09.2010.
  30. Darko Kajfez, Ahmed A. Kishk (2003) – *Dielectric resonator antenna – possible candidate for adaptive antenna arrays* – University of Mississippi, USA.
  31. Andrzej Solecki (2008). *Diagrama de Venn*. <<http://www.andsol.org/portugues/mat/venn.html>>. Acessado em 02.09.2010.
  32. Antenna Standards committee of the IEEE antennas and propagation group (1983). *Standard definitions of terms for antennas*. IEEE Std. 145.
  33. Richtmyer. R.D.(1939). *Dielectric resonators*. J. Applied Physics.
  34. Prof. Regis C. P. Marques (2009). *Antenas e Propagação de Ondas*. Apostila de Curso Superior em Telemática (CEFET – CE).
  35. Rajesh Kumar Mongia, Apisak Ittipiboon (1997). *Theoretical and Experimental Investigations on Rectangular Dielectric Resonator Antennas*. IEEE Antennas and Propagation vol.**45**: **1348 - 1355**.
  36. Atabak Rashidian, Keyvan Forooraghi, Mohammad Reza Tayefeh (2003). *A new method for calculating the resonant frequency of multisegment dielectric resonator antennas*. International Conference on Applied Electromagnetics and Communications.
  37. Simon Kingsley (2005). *Advances in handset antenna design*. <[www.rfdesign.com](http://www.rfdesign.com)>. 2005.
  38. I.S. Ghosh, A. Hilgers, T. Schlenker, R. Porath (2001). *Ceramic microwave antennas for mobile applications* – IEEE Journal of the European Ceramic Society.
  39. Peter H. Dana (2000). Global Positioning System Overview. <[http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html)>. Acessado em 29.09.2010.

- 
40. C-MAX Time Solution. *Antenna Theoretical background*. <<http://www.c-max-time.com/tech/antenna.php>>. Acessado em 05.10.2010.
  41. Jun Kosai, Shugo Kato, Toshiya Saito, Kazuoki Matsugatani, Hideaki Nanba (2009). *Prioritized CSMA Protocol for Roadside-to-Vehicle and Vehicle-to-Vehicle Communication Systems* – SAE Society of Automotive Engineers.
  42. Armando Vieira (2007). *Elementos de radiação e propagação de ondas eletromagnéticas*. ISEP (Departamento de física).
  43. José Roberto Cardoso (2008) - *Introdução ao método dos elementos finitos* – Publicação independente (1ª Edição).
  44. Eric B. Becker, Graham F. Carey, J. Tinsley Oden (1981). *Finite Elements (An introduction)*. Vol. **01**. Texas institute for computation mechanics.
  45. Peter P. Silvester, Ronald L. Ferrari (1996). *Finite elements for electrical engineers*. Third Edition – Cambridge University.
  46. Steinberg, D.M.; Hunter, W.G. (1984). *Experimental design: review and comment*. Technometrics. v.26 (2), p. 71-97.
  47. Ivan Alves de Almeida (2007). *Otimização do processo de usinagem de titânio com laser pulsado de neodímio* – Tese de doutorado IPEN (Autarquia Associada à Universidade de São Paulo).
  48. Bailey JR., W. A.; Clark, T. D. JR. (1992). *Taxi management and route control: A systems study and simulation experiment*. In Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, J. J. Swain, D. Goldsman, R. C. Crain, and J. R. Wilson (Ed.), Arlington, VA, p.1217-1222.
  49. Gordon, S. C.; Ausink, J. J.; Berdine, R. J. (1994). *Using experimental design techniques for spacecraft control simulation*. Sage Journals – Simulation Transactions of the society for modeling and simulation international vol.62: 303-309.
  50. Kuei, C. H.; Madu, C. N. (1994). *Polynomial metamodelling and Taguchi designs in simulation with application to the maintenance float policy*. European Journal of Operational Research, vol.72: 364- 375.
  51. Silveira, Z. C. (2003). *Análise Estatística e Otimização de Parâmetros de Projeto em Componentes de Sistemas Mecânicos*. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
  52. Ke-Li Wu, John Litva (1990). *Full Wave Analysis of Arbitrary Shaped Microstrip Antennas by Triangular Finite Element Method*. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1990. AP-S. Merging Technologies for the 90's. Digest: 628 – 634.
  53. K. C. Clarke (1999). *Finite element analysis of a D-BAND quarterwave microstrip patch antenna* – IEEE Computation in Electromagnetics, 1994. Second International Conference: 291 – 296.
  54. Ansoft Corporation 2005 - *Ansoft High Frequency Structure Simulator v10 User's Guide*. Edição Rev. 01 vol. **10**.
  55. Zhifang Li, John L. Volakis (1999). *Optimization of Patch Antennas on Ferrite Substrate Using the Finite Element Methods* – IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Vol. **02**: 1026 – 1030.
  56. Var Rosenbaum, G. (2008). *Determination of GPS RF Signal Strengths* – Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION: 449 – 458.



## APÊNDICE A - Técnica de Medida de Antena com VNA

Neste apêndice é descrita a parte experimental deste trabalho, através do detalhamento do sistema de medição, mostrado na figura abaixo, assim como dos equipamentos utilizados, procedimentos e montagens realizadas. Algumas características do processo de medição são também abordadas, tais como as principais dificuldades encontradas.

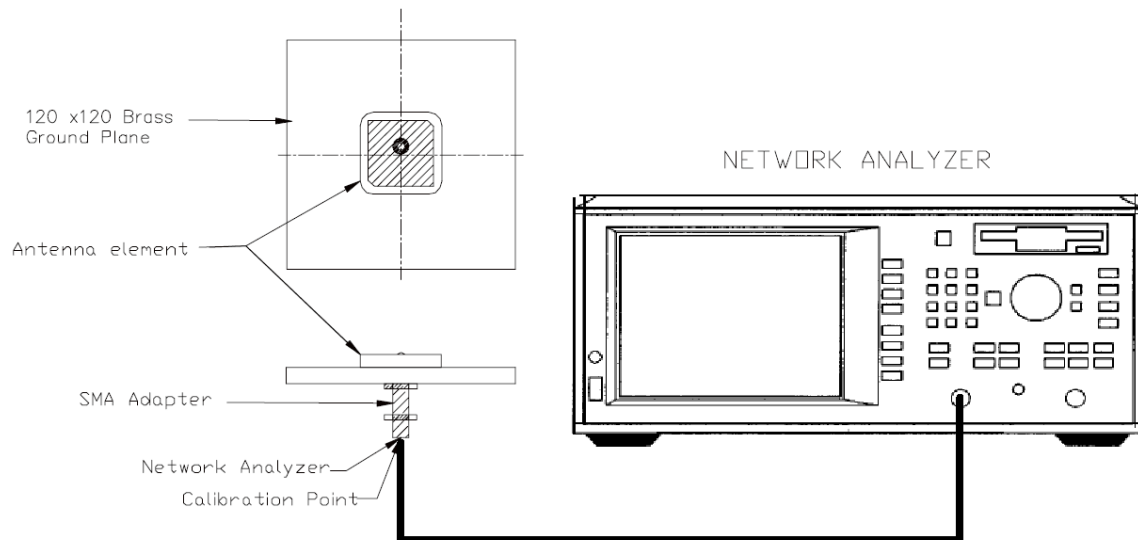


Figura 21: Diagrama do sistema de medição - Setup de validação (antena + VNA HP8714ET).

Fonte: [19] Adaptado de [www.mrccomponents.de](http://www.mrccomponents.de).

Especificações gerais do equipamento VNA HP8714ET:

- Banda de operação: 300 kHz até 3000 MHz;
- Níveis de sinal mínimos: -10 dBm;
- Número de portas: 2 portas (Reflexão – entrada RF, Transmissão – saída RF);

Através da utilização de um VNA (value network analyser) é possível se determinar algumas das características mais importantes de uma antena como o valor do S11 e a impedância de entrada da antena. Além dos parâmetros mencionados, com a utilização de um VNA (value network analyser) é possível se determinar outras medidas conforme listado abaixo:

- Medir a Transmissão do sinal;

- 
- Medir a Reflexão do sinal;
  - Medição de potência utilizando o modo de detecção de banda larga;
  - Medir a perda por retorno;
  - Medir o atraso de AM (Opção 1DA ou 1DB);
  - Fazer medições com entrada auxiliar;
  - Medição de atraso de grupo;
  - Medição de impedância utilizando o gráfico de carta de Smith;
  - Medição do valor da impedância;

Perda por retorno ou reflexão é a perda de potência do sinal resultante por reflexões causada em uma descontinuidade na linha de transmissão ou criada pelo próprio elemento irradiador. Essa reflexão do sinal é geralmente expressa como uma relação em decibéis (dB) conforme mostrado abaixo [18]:

$$S_{11}(dB) = 10 \cdot \log \frac{P_{refl}}{P_{inc}}$$

Onde  $P_{refl}$  é a potência do sinal refletido pelo dispositivo e  $P_{inc}$  é a potência incidente.

Níveis de 0dB indica que toda a potência aplicada na antena é refletida de volta para o VNA, e que nenhuma potência passa pela antena.

Valores menores do que 0dB indicam que a potência é absorvida ou transmitida pela antena. Embora não sejam usualmente encontrados, valores superiores a 0dB ocorrem em determinadas circunstâncias, como por exemplo, quando a medição precisa de ser calibrada.

O processo de medição se inicia com a calibração do equipamento para a faixa de frequência utilizada (de 0,3 GHz até 3 GHz).

Isso é necessário para que os valores lidos no equipamento não sejam mascarados por valores de respostas diferentes entre a faixa de frequência mais alta e a mais baixa.

Em altas frequências [13], os elementos espúrios (como indutâncias de circuitos, capacitância entre os layers de uma placa PCB e a resistência dos condutores) têm um impacto significativo nas medidas da rede em análise.

Para garantir que o cabo utilizado para alimentar a antena planar patch com o sinal gerado pelo analisador de espectro e que outros fatores externos não influenciem nos resultados obtidos, é fundamental a utilização de três cargas conhecidas para que o equipamento consiga

---

se calibrar, eliminando essa influência gerada por fatores externos. Essas cargas possuem valores conhecidos conforme mostrado abaixo:

- Curto circuito;
- Circuito aberto;
- Carga de  $50\Omega$ ;

A figura abaixo mostra detalhes da etapa de calibração utilizando as três cargas para calibrar o analisador de espectro:

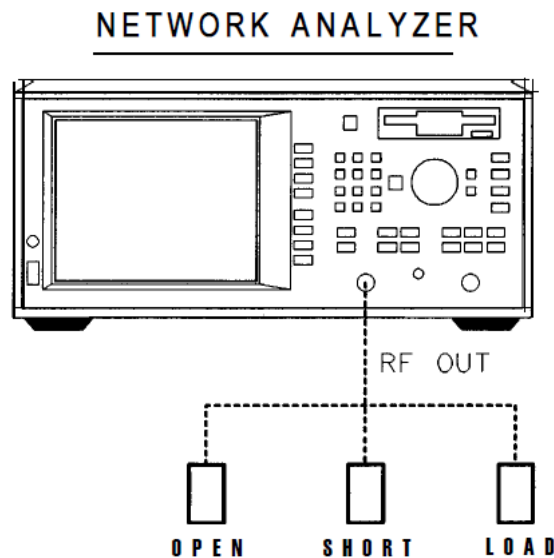


Figura 22: Cargas de calibração do analisador de espectro junto à linha de transmissão – Curto, aberto e carga  $50\Omega$ .

Fonte: [18] [cp.literature.agilent.com](http://cp.literature.agilent.com).

O analisador de espectro tem uma fonte interna de sinal RF que produz um sinal incidente que é usado para estimular a antena planar patch.

A antena em teste então responde ao sinal incidente gerado pelo analisador de refletindo uma parte do sinal gerado pelo analisador de espectro, enquanto que o restante da potência é transmitida pela antena planar patch.

Tendo em vista que a antena é um componente passivo, uma parte da potência transmitida é absorvida, indicando uma “perda” na antena planar patch. Então o sinal gerado pelo analisador de espectro é comparado com o sinal refletido pela antena planar patch, gerando assim o gráfico de perda por retorno.

O analisador de espectro possui dois modos de detecção de sinal:

- Modo de detecção de banda-larga.
- Modo de detecção de banda-estreita.

O analisador de espectro possui dois detectores de banda-larga internos: B\* e R\*. Um detector de banda-larga externo pode ser usado quando conectados às portas X e Y localizados no painel traseiro do analisador de espectro. Quando o analisador de espectro está em modo de detecção de banda-larga, ele mede a potência total de todos os sinais presentes na porta de medição, independente da frequência do sinal.

Este tipo de medição permite obter a caracterização do funcionamento de dispositivos de conversão de frequência, tais como misturadores, receptores e sintonizadores, onde a entrada de RF e frequências de saída não são as mesmas.

Como é possível verificar através da imagem abaixo, a entrada B\* representa a entrada para a detecção de banda-larga enquanto que a entrada R\* representa o sinal de referência. Quando o analisador de rede está no modo de detecção de banda estreita, o receptor está sintonizado na frequência de origem. Neste modo de operação, o analisador de espectro diminui a largura de banda do receptor, criando então um intervalo dinâmico para a medição.

Como é possível verificar através da imagem abaixo, a entrada B representa a entrada para a detecção de banda estreita enquanto que a entrada R representa o sinal de referência.

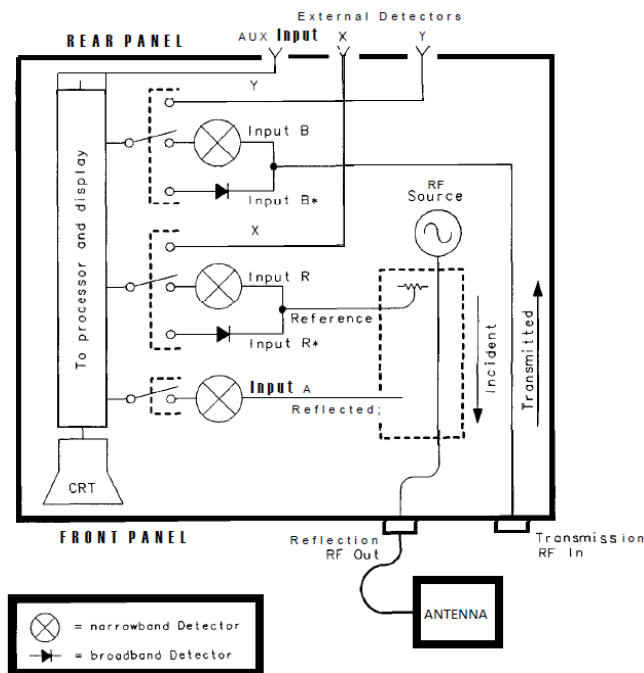


Figura 23: Esquema elétrico interno do analisador de espectro modelo HP8714ET.

Fonte: [18] cp.literature.agilent.com.

---

O objetivo é compreender como os parâmetros da antena pode quantificar de forma absoluta ou relativa a capacidade de irradiar ou receber energia.

Os principais parâmetros estão relacionados com:

- Impedância de entrada;
- Eficiência de irradiação;
- Capacidade de concentrar energia em uma determinada direção;

Conforme determina o “Teorema da reciprocidade” [20], podemos considerar que desde que mantida a frequência, as antenas se comportam igualmente tanto na transmissão como na recepção. Isso significa que os diagramas de radiação, impedância e outros parâmetros são iguais nas duas situações.

A antena foi montada em uma base conectorizada, construída a partir de um perfil de cobre (ao qual foi fixado um conector SMA-fêmea), e utilizado estanho para realizar o contato entre o plano de terra da base de sustentação e o conector SMA-fêmea.

Na montagem da antena no suporte, o contato entre o plano de terra e a base de sustentação deve ser o maior possível, evitando-se a presença de espaços vazios entre os mesmos. Isso porque as medidas podem ser afetadas por esse mau contato, chegando muitas vezes a provocar o desaparecimento ou até mesmo o aparecimento de modos de ressonância não previstos em projeto.

Para garantir um perfeito contato entre o plano de terra da antena planar patch e a base de sustentação, o contato foi realizado através da utilização de uma cola de prata.

A figura abaixo apresenta detalhes da montagem feita entre a antena planar patch e a base de sustentação utilizada na medição das características da antena.

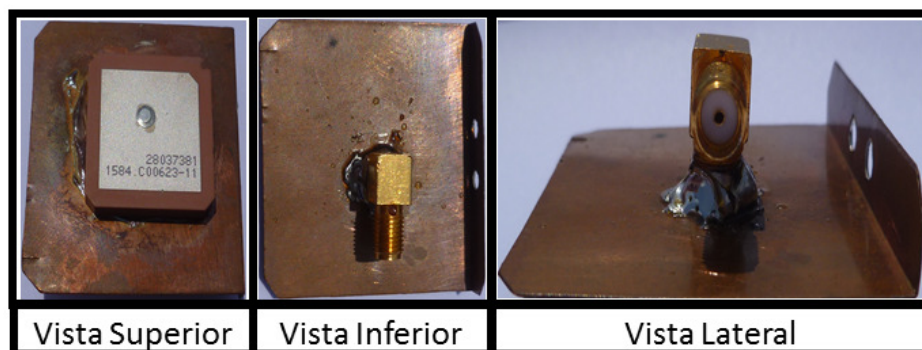


Figura 24: Antena planar patch afixada ao plano de terra e conector SMA.

A figura acima mostra detalhes da montagem do protótipo físico em três vistas (vista superior, vista inferior e vista lateral). Este protótipo foi utilizado na validação física da antena. A

---

antena foi montada sobre uma chapa metálica o que representa o contato da antena com a carroceria metálica do veículo. Solda de estanho para aplicações à calor foi utilizada para efetuar o contato entre a chapa metálica de cobre, antena e conector SMA.

---

## APÊNDICE B – HDA (High Dielectric Antennas)

Em 1980, um novo tipo de antena dielétrica conhecida como DRA (Dielectric Resonator Antenna) ou até mesmo apenas DR (Dielectric Resonators) [29] começou a ganhar seu espaço.

Nesse tipo de antena, o mecanismo de irradiação é gerado por uma corrente de deslocamento circular em um meio dielétrico, geralmente uma pastilha cerâmica.

Desde 1970, ressoadores dielétricos tem-se mostrado uma técnica eficiente para se alcançar a miniaturização de componentes de microondas ativos e passivos [30], tais como osciladores e filtros.

Parece quase um contra-senso tentar projetar uma antena a partir de um material de isolamento, mas na verdade em frequências de rádio, estes materiais melhoram o deslocamento irradiando [33].

Este tipo de antena oferece alguns atrativos bastante interessantes como tamanho reduzido [35, 36], alta eficiência de radiação, compatibilidade com MIC (Microwave integrated circuit), simplicidade mecânica intrínseca além da facilidade em se obter diferentes padrões de radiação usando diferentes modos de propagação.

A utilização de substratos de alta constante dielétrica [28] tem-se mostrado um grande artifício ao reduzir consideravelmente o tamanho do elemento radiador da antena com uma relação de  $(\epsilon_r)^{-1/2}$  [38], devido ao comprimento de onda mais curto nesses tipos de substrato e a natureza ressonante do elemento radiador da patch antena em questão [28].

Em especial, as DRA's retangulares oferecem vantagens práticas sobre as DRA's de formas cilíndricas e esféricas. Isso pois os modos destrutivos podem ser evitados quando escolhemos adequadamente as três dimensões do ressonador, o que não acontece para as DRA's de formas cilíndricas e esféricas.

Outro fator importante é que a largura de banda de uma antena DR depende de suas dimensões. Por esse motivos, as DRA's retangulares fornecem mais flexibilidade em termos de controle de largura de banda.

Através de um diagrama de Venn (recebe este nome pois foi criado por John Venn em 1880 [31]) podemos representar todo o espaço de antenas HDA (High Dielectric Antennas) possíveis.

Como é possível verificar na imagem abaixo, as antenas do tipo DRA (Dielectric Resonator Antenna) estão representadas dentro do diagrama de Venn e ocupam seu espaço dentro do conjunto de antenas HDA (High Dielectric Antennas).

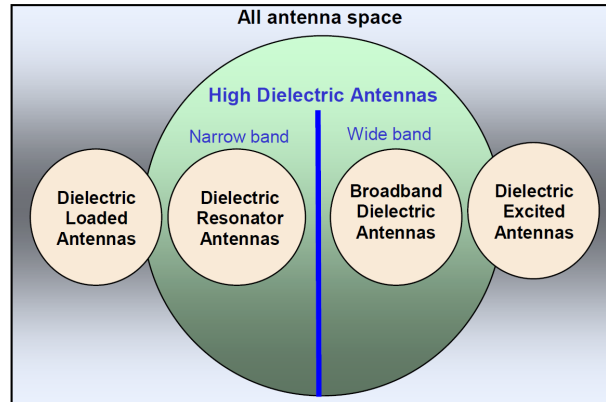


Figura 25: Representação através do diagrama de Venn para HDA (High Dielectric Antennas).

Fonte: [29] [www.antenova.com](http://www.antenova.com).

A energia armazenada no interior do dielétrico [29,37] é muito elevada, e geralmente mais resistente à proximidade de objetos externos ou outras antenas, evitando que estes perturbem a sua frequência de ressonância.

### Modos de propagação e frequência de ressonância

De acordo com Van Bladel, os modos de propagação de uma DR são classificados como confinado e não-confinados. Para uma simples DR retangular localizada no espaço livre, as equações obtidas em uma das paredes da condição de contorno satisfazem a condição:

$$E \cdot n = 0$$

Onde “E” representa a intensidade do campo elétrico e “n” representa a normal da superfície do ressonador, o produto escalar entre o campo elétrico e a normal da superfície do ressonador é zero para todas as paredes da condição de contorno.

Outra relação importante é:

$$n \times H = 0$$

Onde “H” representa a intensidade do campo magnético e “n” representa a normal da superfície do ressonador, esta relação não atende à todas as superfícies do DR para todos os modos de propagação.



Os modos de propagação que atendam à ambas as relações ( $E \cdot n = 0$ ) e ( $n \times H = 0$ ), são denominadas como confinadas, enquanto para os modos que atendam apenas a relação de ( $E \cdot n = 0$ ) são denominados como não-confinados.

Uma DR retangular tem três dimensões independentes. Por esse motivo, os modos de propagação de uma DR, podem ser TE em qualquer uma das três dimensões. Referindo-se à DRA e sistema de coordenadas conforme mostrado na figura abaixo, os modos de propagação com os índices mais baixos são  $TE^x_{111}$ ,  $TE^y_{111}$  e  $TE^z_{111}$ .

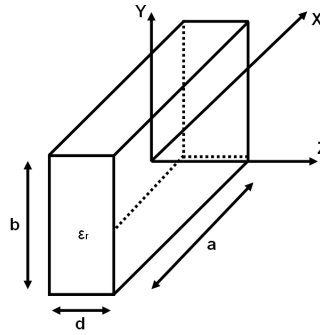


Figura 26: Antena DR (Dielectric resonator) retangular no espaço livre.

Fonte: [35] Adaptado de Theoretical and experimental investigations on rectangular dielectric resonator antennas.

Se as dimensões da DR são tais que  $a > b > d$ , então os modos de propagação na ordem crescente de frequência de ressonância são  $TE^z_{111}$ ,  $TE^y_{111}$  e  $TE^x_{111}$ . A análise de todos os modos é semelhante. Por exemplo, para o modo  $TE^z_{111}$ , os componentes do campo no interior do ressonador pode ser derivado na direção z do potencial magnético. Isto leva as seguintes componentes de campo [35]:

$$H_x = \frac{(k_x k_z)}{j\omega\mu_0} A \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$H_y = \frac{(k_y k_z)}{j\omega\mu_0} A \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z)$$

$$E_x = A k_y \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$E_y = -A k_x \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

$$E_z = 0$$

Onde “A” representa uma constante arbitrária e “ $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ ” representam o número de onda nas direções de x, y, e z respectivamente, dentro da DR. Considerando a posição ( $|y|=b/2$  e  $|x|=a/2$ ), as equações abaixo são obtidas para  $K_x$  e  $K_y$  [35]:

$$K_x = \frac{\pi}{a}$$

$$K_y = \frac{\pi}{b}$$

Então, utilizando o modelo de guia de onda do dielétrico, a equação abaixo é obtida para  $K_z$ :

$$K_z \tan\left(\frac{k_z d}{2}\right) = \sqrt{(\epsilon_r - 1)k_o^2 k_z^2}$$

O número de onda “ $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ ” deve satisfazer a condição de propagação:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \epsilon_r k_o^2$$

Onde  $k_o$  representa o número de onda correspondente à frequência de ressonância no espaço livre:

$$k_o = \frac{2\pi}{c} f_0$$

A figura abaixo demonstra o padrão de radiação de campo elétrico para o modo  $TE_{011}$ , considerando um ressonador dielétrico na forma de cubo:

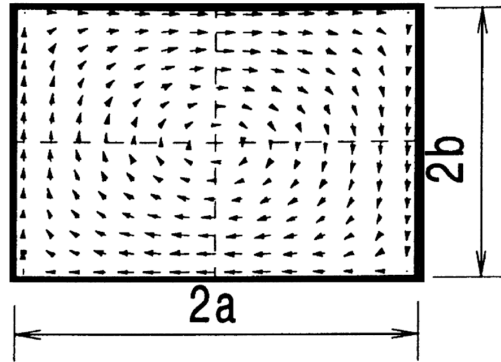


Figura 27: Padrão de radiação no modo  $TE_{011}$  de uma DR (Dielectric resonator).

Fonte: [38] Ceramic microwave antennas for mobile applications.

Como é possível perceber, o tipo de polarização para este tipo de DR é circular, ideal para aplicações de comunicação com satélites. Por definição, as antenas de GPS devem ser concebidas com o tipo de polarização circular RHCP (Right Hand Circular Polarization). O

---

sentido da polarização pode ser RHCP ou LHCP dependendo do sentido de observação da direção de rotação do vetor de campo elétrico atrás da fonte [32].

A combinação de duas ondas linearmente polarizadas, uma vertical e outra horizontal, de mesma amplitude e eletricamente defasadas de 90 graus, resulta em uma onda circularmente polarizada.

## **Esquema de alimentação**

No projeto de antenas, uma das partes mais importantes é considerar um modo de alimentação adequado para o tipo da antena e para a sua aplicação. Neste trabalho, adotamos o método de alimentação através de um pino interno ao dielétrico, que passa através de um furo até chegar no elemento irradiador da antena.

Para este caso, o acoplamento entre a DRA e o pino de alimentação, pode ser controlado através do diâmetro do pino e seu tamanho.

Para a excitação de DRA's com valores elevados de  $\epsilon_r$  [35], é necessário considerar tamanhos mais curtos para o pino de alimentação. Para DRA's fabricadas com material dielétrico com  $\epsilon_r=20$ , como no caso da antena desenvolvida neste trabalho, o tamanho do pino de alimentação é aproximadamente igual ao tamanho do ressonador da DRA.

## **Principais parâmetros de antenas e requerimentos para materiais cerâmicos**

Os principais parâmetros de uma antena são [38] frequência de ressonância, perda por retorno, fator Q e largura de banda, eficiência, diretividade e ganho.

O desempenho de materiais dielétricos é normalmente especificado pelo fator de qualidade (Q), que é inversamente proporcional à perda [34]. O fator Q (quando o material não está irradiando) deve ser o mais alto possível, certamente superior à 1000.

Materiais com valores inferiores de Q não ressoam bem, nem fazem antenas altamente eficientes.

Em um material de baixo Q, a potência irradiada pela antena será apenas uma porcentagem da potência emitida, sendo o restante perdido como calor.

Materiais cerâmicos com um alto Q, estão geralmente associada à uma alta densidade de material, e por conseguinte porosidade e técnicas de fabricação devem ser rigorosamente controlada para alcançar bons resultados.

---

Geralmente o fator Q do ressonador [38, 40] é definido como a relação entre a energia gerada pela energia dissipada. Para uma antena cerâmica, a energia dissipada é a soma da potência irradiada  $P_{rad}$ , a potência dissipada pela parte metálica (impedância)  $P_{cond}$  e a potência dissipada devido a perdas no dielétrico do material cerâmico  $P_{diel}$ . Com isso podemos concluir que:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{rad}} + \frac{1}{Q_{cond}} + \frac{1}{Q_{diel}}$$

A largura de banda de uma antena é definida como a faixa de frequência na qual a perda de retorno da antena é menor do que um determinado valor (neste trabalho, foi considerado uma relação de 2:1, ou seja, -10 dB).

A relação de largura de banda está diretamente ligada ao fator Q da antena, através da seguinte relação [38]:

$$BW = \frac{f}{\sqrt{2Q}}$$

A eficiência da antena é definida como a relação entre a potência irradiada sobre a potência total de entrada fornecida para a antena. Também podemos expressar a eficiência da antena com relação ao fator Q:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{Q_{cond}}{Q_{rad}} + \frac{Q_{diel}}{Q_{rad}}}$$

Temos como ideal uma eficiência igual a um. Para isso, se faz necessário termos a relação de  $Q_{rad} \gg Q_{cond}$  e  $Q_{rad} \gg Q_{diel}$ .

A diretividade “D” relaciona o padrão de radiação da antena. Este é definido como a relação da potencia irradiada em uma determinada direção sobre a potência média radiada por unidade de ângulo:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{4\pi \cdot d \cdot P_{rad}(\theta, \varphi) / d\Omega}{P_{rad}}$$

---

## Ganho

O ganho de uma antena pode ser classificado com ganho relativo ou ganho absoluto.

Ganho relativo máximo “G” é definido como sendo a relação entre a intensidade máxima da antena pela intensidade máxima de uma outra antena tomada como referência. Naturalmente, as antenas são submetidas à mesma potência.

$$G = \frac{U_{m\acute{a}x}}{U_{\max}(refer\acute{e}ncia)}$$

As antenas usadas como referência são: antena isotrópica, dipolo de meia onda, antena corneta e etc.

O ganho de uma antena é normalmente dado em dB, onde:

$$G_{dB} = 10 \log G$$

Se a antena de referência usada é a isotrópica, o ganho é dado em dBi. Para o caso da antena de referência ser um dipolo de meia onda, o ganho é dado em dBd. Observe que  $G_{dBi} = G_{dBd} + 2,15$  ou, um ganho de 10 dBd é igual à 12,15dBi.

Se a antena de referência for isotrópica, então temos:

$$U = \frac{P_T}{4\pi}$$

$$G = 10 \cdot \log(4\pi \frac{U_{\max}}{P_T}) dBi$$

Podemos observar que o ganho em relação à isotrópica é igual à diretividade da antena, supondo seu rendimento é unitário. Podemos observar também que o ganho de uma antena isotrópica é igual à 1.

O ganho absoluto é determinado pela fórmula:

$$G = \frac{U_{\max}}{U_{\text{medio}}}$$

Podemos observar que o ganho absoluto é numericamente igual ao ganho da antena em relação à antena isotrópica.

---

## Diagrama de radiação

O diagrama de radiação nada mais é do que o mapeamento da distribuição de energia irradiada, levando em conta o campo bi-dimensional ou tri-dimensional. Em geral os diagramas de radiação são apresentados de duas maneiras:

- Através de um diagrama de campo.
- Através de simulação computacional (nesta dissertação iremos mostrar simulações feitas através do artifício de simulações computacionais).

Para se criar um diagrama de radiação, se faz necessário tomá-lo a partir de uma distância e localização onde não seja possível a interferência de elementos estranhos ao meio onde se encontram a antena de prova e a antena de teste. Por este motivo são necessários para validações de antenas as chamadas cameras anecóicas que fazem com que os sinais não se reflitam nas paredes, ou seja, sejam absorvidos pelas paredes absorvedoras da camara.

A figura abaixo demonstra um setup de validação para se obter um diagrama de radiação de uma antena através da utilização de uma camara anecóica.

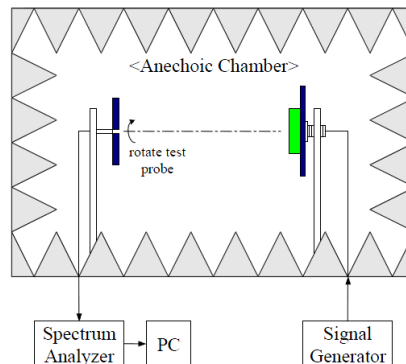


Figura 28: Setup de validação para se obter um diagrama de radiação de uma antena através da utilização de uma camara anecóica.

Fonte: [19] [www.mrccomponents.de](http://www.mrccomponents.de).

São necessárias duas antenas para levantar-se o diagrama de radiação através de um teste físico, uma antena de teste e outra de prova como mostrado na figura abaixo. Deve-se então ligar um transmissor a antena de teste e um receptor na antena de prova, e então girar a antena de teste e medir o campo na antena de prova. Os valores são anotados em uma tabela e então são transcritos na forma de gráfico.

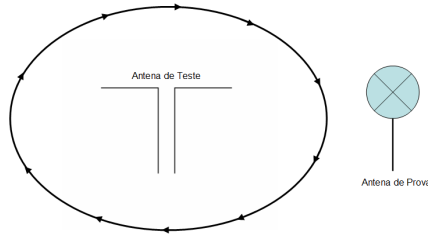


Figura 29: Teste físico da antena (diagrama de radiação).

Elementos estranhos que interferem podem ser desde árvores, calhas, rufos, arames, linhas de transmissão de energia ou telefônicas. Estruturas de concreto armado também interferem no resultado de um diagrama de radiação/recepção pelo fato de existir ferro em seu interior. Por esse motivo as cameras anecóicas são bastante utilizadas para esse tipo de validação.

O diagrama de radiação de uma antena [10], ou simplesmente o diagrama da antena é definido como “uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais, onde as propriedades de radiação incluem densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização.

Uma curva representando o campo elétrico (magnético) recebido a um raio constante é referida como diagrama de amplitude de campo, por outro lado, um gráfico da variação espacial da densidade de potência ao longo de um percurso de raio constante é chamado de diagrama de amplitude de potência.

Em geral diagramas de campo e potência são normalizados em relação a seu valor máximo, resultando em diagramas normalizados de campo e de potência. Para o caso de diagramas de potência, geralmente são utilizadas escalas logarítmicas para a construção. Isso porque através da utilização da escala logarítmica para a construção do diagrama de potência, é possível realçar aquelas partes do diagrama que possuem valores menores, denominados de lóbulos secundários.

Como mostrado acima, o diagrama de radiação é subdivididos em lóbulos conhecidos como “lóbulo principal e lóbulo secundário”. O lóbulo principal é definido como o lóbulo de irradiação que contém a direção de máxima irradiação enquanto o lóbulo secundário é a definição dada para qualquer outro lóbulo que não seja o lóbulo principal.

---

Assim, podemos classificar os lóbulos laterais, que são os lóbulos de irradiação em qualquer direção que não o desejado como lóbulo posterior que é um lóbulo de radiação cujo eixo faz um ângulo de aproximadamente 180° com o feixe da antena.

Consideremos uma antena no centro de uma esfera de raio “r” irradiando uma potência  $P_T$ . Vamos em sequência adicionar um medidor de densidade de potência (ou de campo elétrico) nos pontos da superfície esférica e obter os valores de  $W_R$  em função de  $\theta$  e  $\varphi$ , onde  $W_R$  é representado pela seguinte expressão:

$$W_R = \frac{\Delta P}{\Delta S} (\text{Watts}/m^2)$$

Onde  $\Delta S$  normal à direção de propagação da onda e  $\Delta P$  a potência que flui através dessa área. Com os valores obtidos, podemos elaborar um desenho tridimensional de  $W_R$  em função de  $\theta$  e  $\varphi$ . A figura abaixo mostra o gráfico de  $W_R$  de uma antena isotrópica em função de  $\theta$  e  $\varphi$ .

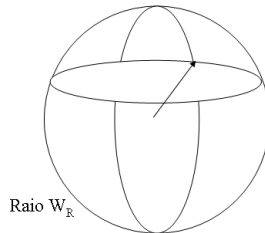


Figura 30: Gráfico de  $W_R$  de uma antena isotrópica em função de  $\theta$  e  $\varphi$ .

Como é possível observar, o diagrama representa uma esfera de raio  $W_R$ .

Conforme mostrado na figura abaixo, um diagrama de radiação pode ser representado de diferentes maneiras. Podemos representar o diagrama de radiação na forma polar, cartesiana ou em 3D (geralmente geradas através de softwares de simulação). A figura abaixo mostra as diferentes formas de representação para o caso de uma antena “direcional”.



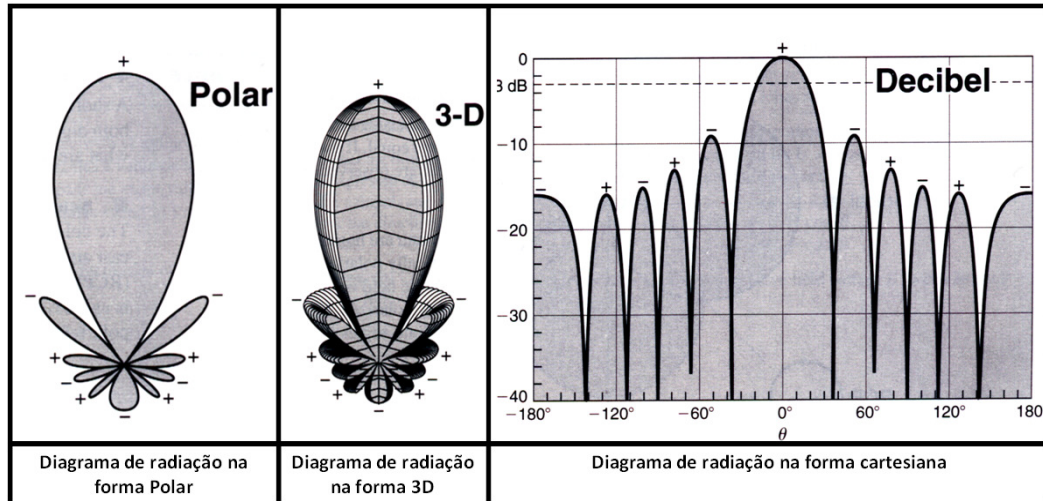


Figura 31: Diferentes formas para se representar um diagrama de radiação de uma antena.

### **Coefficiente de temperatura**

Uma mudança na constante dielétrica [29], ou variação do tamanho físico da antena com temperatura, fará com que a frequência de ressonância de uma antena dielétrica afaste-se da frequência de ressonância desejada.

Em alguns casos de antenas dielétricas, como por exemplo, as DRA's, que possuem bandas bastante estreitas, aproximadamente 5%, este poderia ser um problema sério.

Idealmente, o coeficiente de temperatura deve ser zero, mas com um design cuidadoso, os valores até cerca de cem partes por milhão pode ser tolerada.

Quando consideramos o painel de um veículo, para a localização de uma antena, o coeficiente de temperatura deve ser projetado de forma bastante cuidadosa, uma vez que as temperaturas dentro do habitáculo do veículo podem variar de  $-5^{\circ}\text{C}$  até  $85^{\circ}\text{C}$ .

---

## APÊNDICE C – Conceitos básicos de antenas

Antena é o um dispositivo utilizado para comunicações em distancia através de radiofrequência [10]. É responsável por transformar energia eletromagnética guiada pela linha de transmissão em energia eletromagnética irradiada.

Pode-se também dizer que esta lei serve também no sentido inverso, isto é, transformar energia eletromagnética irradiada em energia eletromagnética guiada para a linha de transmissão.

Por sua própria natureza de funcionamento, é possível perceber que a antena ocupa sempre o último lugar na cadeia de transmissão e o primeiro lugar na cadeia de recepção, daí a importância de seu estudo e entendimento para as telecomunicações.

Presume-se que as primeiras antenas foram criadas por Heinrich Hertz, em meados de 1886, com a finalidade de auxiliar no estudo e desenvolvimento das teorias eletromagnéticas. Hertz pesquisou diversos dispositivos durante a realização de seus experimentos para testar, provar e validar a teoria sobre eletromagnetismo desenvolvidas pelo matemático e físico James Clerk Maxwell.

Desde as primeiras antenas até a atualidade, os princípios físicos que regem seu projeto e desenvolvimento foram sendo aprimorados e descobertas novas maneiras e tecnologias de se transmitir e receber sinais eletromagnéticos.

Atualmente, as antenas em alguns casos são estruturas de extrema complexidade e importância nas comunicações, sendo talvez para o homem moderno tão importante quanto foi a descoberta do fogo e a invenção da roda para o desenvolvimento tecnológico humano.

Em outras palavras, uma antena é a estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento, como mostrado na figura abaixo.

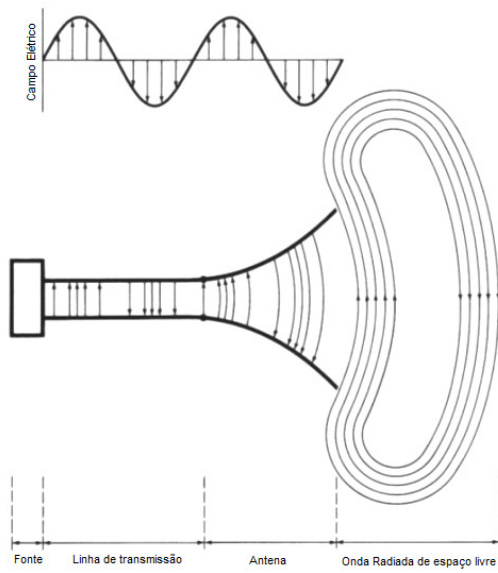


Figura 32: Antena como um dispositivo de transição.

Fonte: [10] Teoria de antenas – Constantine A. Balanis.

## Propagação de ondas

### Campos:

O termo campo está estritamente relacionado à existência de uma força qualquer que age em uma determinada região do espaço [34]. Desta forma, na prática não medimos a intensidade de um campo, mais sim a intensidade da força ou de algum fenômeno por ela causado.

### Campo Elétrico:

Quando aplicamos uma tensão ( $V$ ) nos terminais de um capacitor e em seguida retiramos a alimentação [34], podemos perceber que o capacitor armazena a energia no dielétrico fazendo com que a tensão ( $V$ ) permaneça presente em seus terminais mesmo após a eliminação da fonte de alimentação. Essa energia armazenada entre suas placas forma o que chamamos de campo elétrico  $E$ .

Assim como comentado acima, na prática não medimos o campo elétrico, mais sim a tensão que ele gera em seus terminais.

### Campo Magnético:

Quando forçamos a passagem de corrente elétrica, por exemplo em um condutor, o que temos é a formação de um campo magnético  $H$  em volta do fluxo de cargas. Assim como acontece

---

no caso do campo elétrico, não medimos o campo magnético mais sim a corrente elétrica que ele induz em outros materiais ao seu redor [34].

**Campo eletromagnético:**

Os dois casos acima campo elétrico (concentração de cargas estáticas) e campo magnético (cargas em movimento) são diretamente relacionados quando pensamos em uma fonte de tensão alternada onde é gerado o campo elétrico devido à diferença de potencial e ao mesmo tempo é observado é gerado o campo magnético devido ao movimento das cargas [34]. Dessa forma as componentes elétricas e magnéticas são indissociáveis, dando origem assim ao campo eletromagnético.

**Características dos meios**

**Permeabilidade magnética:**

As grandezas que determinam as influências do campo eletromagnético dependem de diversas propriedades do meio, ou seja, quando o meio for o vácuo, a indução magnética assume um determinado valor conhecido conforme mostrado abaixo:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H / m)}$$

Este valor é modificado quando assumimos um novo meio material. Ou seja, existe uma característica que altera o valor da indução em cada meio.

Desta forma, estabeleceu-se que a indução magnética  $b$  é diretamente proporcional ao valor da permeabilidade, determinando a relação com o campo magnético  $h$  conforme mostrado abaixo:

$$\vec{b} = \mu \vec{h}$$

Para considerarmos o valor para a permeabilidade magnética real de trabalho, costuma-se comparar a permeabilidade do meio com a do vácuo conforme mostrado abaixo:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

**Permissividade elétrica:**

Assim como mostrado acima para a permeabilidade magnética, uma análise semelhante deve ser feita para os efeitos que o meio exerce sobre o valor do campo elétrico. Por consequência

---

da orientação da polarização interna do meio material, o campo resultante tende a ser menor do que o existente no vácuo.

A relação é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior for a permissividade menor a intensidade de campo gerado. A permissividade no vácuo esta relacionada com a permeabilidade magnética e a velocidade da luz conforme equação mostrada abaixo:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} (F / m)$$

Este valor é aceitável com uma boa aproximação para o ar, no entanto para outros materiais é necessário fazer uma correção introduzindo o fator conhecido como permissividade relativa conforme mostrado abaixo:

$$\mathcal{E} = \epsilon_r \epsilon_0$$

### **Condutividade elétrica:**

É a capacidade que o material possui de condução de cargas pela sua superfície. A condutividade depende da característica de cada meio, onde se esse meio for um condutor perfeito, esse parâmetro tende para o infinito enquanto para um dielétrico perfeito a sua condutividade seria nula.

Um ponto importante a ser observado é que o mesmo meio pode funcionar como condutor para uma determinada frequência e como dielétrico para outra.

### **Ondas eletromagnéticas**

Utilizada para o transporte de energia e de comunicação [42], a radiação eletromagnética esta presente em quase todas as vertentes da tecnologia atual. Existem diversas aplicações para o fenômeno eletromagnético, e dentre eles o mais importante que é o de transmissão de dados utilizado na telecomunicação.

O espectro eletromagnético é dividido por faixas de frequências e por volta do século XIX foi descoberto que a luz visível consiste na propagação de ondas eletromagnéticas, correspondendo cada cor do espectro a uma determinada frequência. Acabou por verificar-se que todas as radiações são a manifestação de um mesmo fenômeno físico: a propagação de um campo elétrico e um campo magnético associado.

A antena transmissora transforma variações de tensão e corrente elétrica, produzidas pelo equipamento transmissor, em ondas eletromagnéticas, sendo a antena receptora responsável

---

pela captação dessas ondas e responsável pela conversão dessas ondas eletromagnéticas em sinais elétricos.

### **Frente de onda**

A frente de onda depende diretamente do elemento irradiante utilizado, no caso da antena isotrópica a frente de onda é esférica, já em um fio condutor, a frente de onda é cilíndrica.

A propagação da onda eletromagnética se dá pelo fenômeno em cascata de um campo elétrico gerar um campo magnético induzido, que por sua vez também gera um campo elétrico induzido e esse fenômeno se repete ao longo da direção de propagação da onda.

### **Equações de Maxwell**

Baseando-se nos estudos de Michael Faraday [34], Maxwell unificou, em 1864, todos os fenômenos elétricos e magnéticos observáveis em um trabalho que estabeleceu conexões entre as várias teorias da época, derivando uma das mais elegantes teorias já formuladas.

Maxwell demonstrou, com essa nova teoria, que todos os fenômenos elétricos e magnéticos poderiam ser descritos na forma diferencial em apenas quatro equações [45]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{h} = \sigma \vec{e} + \epsilon \frac{\partial \vec{e}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{e} = -\mu \frac{\partial \vec{h}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{d} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{b} = 0$$

Onde “e” é o campo elétrico, “b” a indução magnética, “h” o campo magnético, “d” o deslocamento elétrico, “σ” a condutividade do meio, “ρ” a densidade volumétrica de cargas, ξ a permissividade elétrica e μ a permeabilidade magnética do meio.

Pode-se concluir através das equações de Maxwell descritas acima que a presença de uma corrente elétrica ou a variação de um campo elétrico no tempo dará origem a um campo magnético induzido.

---

Tendo como base as equações de Maxwell, podemos notar que variação do campo elétrico no tempo inicia a formação do campo magnético induzido. Simetricamente, a equação indica que quando houver um campo magnético variando no tempo, surgirá um campo elétrico induzido. O resultado deste fenômeno é uma sucessão de campos elétrico e magnético que se induzem mutuamente e afastam-se da origem, constituindo a onda eletromagnética.

### **Campos de irradiação e propagação**

O princípio da pedra jogada numa lagoa é o exemplo mais clássico de campos de irradiação e propagação.

As ondas produzidas no meio de uma massa líquida por uma pedra lançada e mesmo depois que a pedra já chegou ao fundo, as ondas produzidas continuam se propagando.

A pedra e sua queda, não são necessárias à manutenção das ondas, mas foram prementes à sua criação, porém o efeito (propagação de ondas) teve seu prosseguimento, independente daquela ter cessado.

As linhas de fluxo, concêntricas em forma de ondas transportam energia, a este deslocamento, define-se como propagação. A energia contida nas ondas chama-se energia irradiada ou campo distante (analogamente no caso da água), a água espirrada acelerada pelo impacto da pedra e, em volta dela, para efeito de analogia pode ser definida campo próximo.

### **Tipos de linhas de campo**

#### **Campo próximo**

Existem dois tipos de distribuição de linhas de campo, as mais próximas da antena que deixam de existir imediatamente ao cessar a causa. Isto é, quando cessa a corrente esta sofre a anulação por um semi-ciclo, e as linhas não chegam a se fechar, portanto, não se propagam. Este efeito é definido "campo próximo, de Fresnel ou campo de indução".

#### **Campo distante**

Quando as linhas se fecham, portanto se propagam no espaço carregando consigo energia irradiada, análogo ao exemplo acima, denomina-se "campo distante, ou de Fraunhofer, ou campo de irradiação".

Nas antenas que utilizam refletores, ambos são importantíssimos, "o campo elétrico na região distante varia com o inverso da distância, enquanto que na região próxima isto não acontece".

---

### **Importância do campo próximo**

A região de indução (campo próximo) é geralmente usada no projeto de antenas com um ou vários elementos de forma a induzir nestes a energia que estaria perdida. Desta forma aproveitando-a, induzindo-a ao elemento parasita, tanto diretor, quanto refletor, se for o caso.

### **Importância do campo distante**

A região distante é importante para as radiocomunicações, portanto, deve ser delimitada a fronteira entre elas.

### **Delimitação de campos próximo e distante**

Para a região de campo próximo reativo, podemos considerar à equação abaixo para delimitar o seu raio, fazendo com que a região de campo próximo reativo seja definida:

$$R < 0,62 * \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

Para a delimitação da região de campo próximo radiante (região de Fresnel) utilizamos como base à equação abaixo:

$$R < 2 * \frac{D^2}{\lambda}$$

#### **Onde:**

R = separação entre as duas regiões.

D = o maior tamanho da antena.

$\lambda$  = comprimento de onda.

Além dessas duas delimitações de distância, ainda temos também a região de campo distante (região de Fraunhofer) que esta associada à radiação externa a duas limitações definidas acima.

### **Propagação em espaço livre**

Levando em consideração que o espaço livre é uma região sem obstáculos ou superfícies e afastada do solo, podemos considerar a afirmação abaixo:

$$S = \frac{P}{4\pi r^2} \text{ (Watts / m}^2\text{)}$$

#### **Onde:**

P = potência irradiada por uma antena isotrópica



---

$r$  = distância do ponto de análise até a antena  
 $S$  = densidade de potência irradiada

A expressão acima mostrada considera que para um ambiente desobstruído e sem perdas (espaço livre), a densidade de potência “P” da onda eletromagnética é inversamente proporcional ao quadrado da distância “r”. Desta maneira, de acordo com a teoria eletromagnética, esta grandeza está relacionada com a intensidade do campo eletromagnético gerado no ponto do espaço em que a medição é realizada.

### **Irradiação**

Considerando o caso de uma antena real, existem direções onde a densidade de corrente irradiada é maior, e outras direções que essa grandeza é menor ou até mesmo nula. Então, para o caso de uma antena real, a densidade de potência é uma função da direção representada por  $(\theta, \varphi)$ . Portanto uma generalização da equação anterior deve ser da forma:

$$S(\theta, \varphi) = S_{\max} f_p(\theta, \varphi)$$

Conhecido como diagrama de irradiação, a representação desta função é feita em gráficos tridimensionais ou em planos específicos.

A diretividade da antena é dada pela comparação entre a densidade máxima de potência e a densidade média irradiada.

### **Parâmetros de antenas**

Existem diversos parâmetros críticos de antenas a se considerar para o projeto. O desempenho da antena é afetada por parâmetros ajustados no projeto, tais como: frequência de ressonância, impedância, ganho, diagrama de irradiação, polarização, eficiência e largura de banda. As antenas transmissoras também têm a máxima potência, e as antenas receptoras diferem nas características de rejeição a ruído.


### **Irradiação e diretividade de uma antena**

Exemplos típicos de antenas direcionais são as antenas parabólicas utilizadas em radares, pois transmitem e recebem os sinais para a radio-localização de objetos.

A antena é um sistema que irradia (ou recebe) energia eletromagnética. Se pode conhecê-la a partir do processamento da irradiação, da eficiência e da distribuição da energia irradiada através do campo, dentro do espectro conhecido, ou arbitrado.


---

## ANEXO A – Especificação da antena comercial usada como referência de projeto

	SPECIFICATION	PAGE
	CERAMIC PATCH ANTENNA	1/4

### 1. Revision History

Revision no	Content	Date
0	First, Documented	2006.09.21

	<b>SPECIFICATION</b>	<b>PAGE</b>
	<b>CERAMIC PATCH ANTENNA</b>	<b>2/4</b>

**2. Specification**

**2.1 Electrical Characteristic**

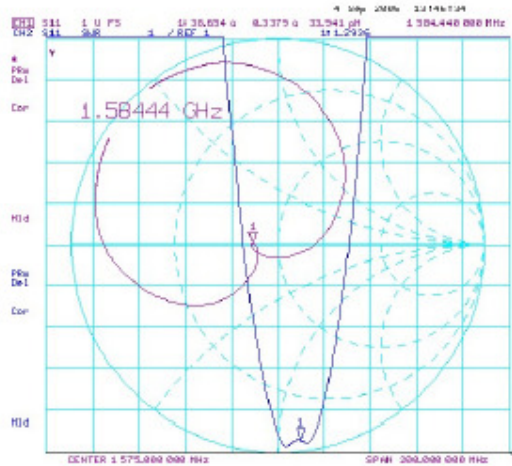
No	Item	Specification	Unit	Remarks
1	Center Frequency(fc)	-	MHz	Notes : 1)
		1584.0 ± 3	MHz	Notes : 2)
2	VSWR @ fc	Max. 1.7 (Typical 1.3)	-	Notes : 2)
3	Axial Ratio @ fc	Max. 3.0 (Typical 2.5)	dB	Notes : 2)
4	Gain @ fc	5.0 dBic Typical @ Zenith	dBic	Notes : 2)
5	Polarization	RHCP	-	-
6	Impedance	50	Ω	-


- fc is mid point of loop/cusp in smith chart.

※ Notes: 1) Measured in customer set and with adhesive tape.

Notes: 2) Measured on 120X120 Brass ground plane(AMOTECH REF jig) with SMA connector.

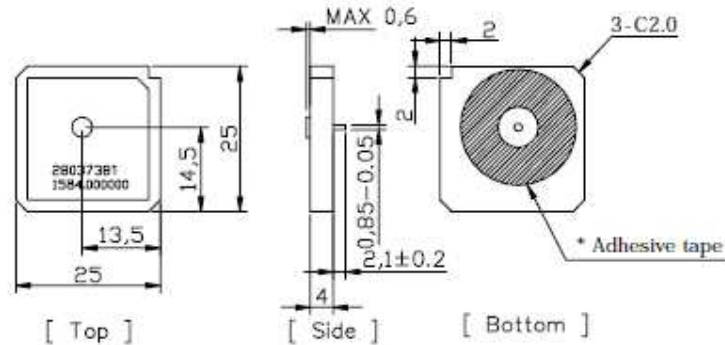
**2.1.1 Typical S11 (Smith Chart and VSWR)**



	<b>SPECIFICATION</b>	<b>PAGE</b>
	<b>CERAMIC PATCH ANTENNA</b>	<b>3/4</b>

## 2.2 Mechanical Characteristic

### 2.2.1 Dimension



1. UNIT : mm
2. TOLERANCE : ±0.2

Marking : 28037381\_1584.Lot No

### 2.2.2 Mechanical Characteristic

No	Item	Specification	Unit	Remarks
1	Dielectric Constant	20.5 ± 0.5	-	-
2	Temperature Coefficient	0 ± 10	ppm/°C max.	-
3	Electrode	Silver	-	-
4	Probe	Silver Plated Brass	-	B-θ (6.3mm)
5	Tape	Double sided adhesive tape	-	ADT-D200A 3M 468MP

### 2.3 Lot numbering

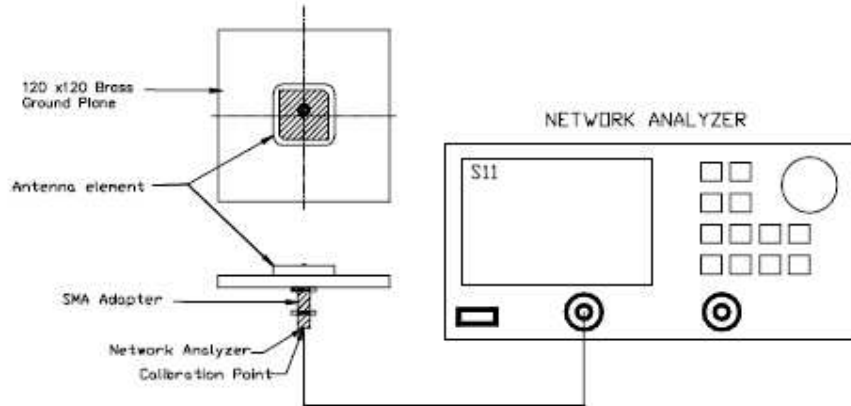
Lot No:  $\frac{XX}{(1)} - \frac{XX}{(2)} - \frac{XX}{(3)} \frac{XX}{(4)}$

- (1) : Year for making Ceramic Body
- (2) : Month for making Ceramic Body
- (3) : Ceramic Body Type
- (4) : Manufacturing number per month according to Ceramic Body Type

	SPECIFICATION	PAGE
	CERAMIC PATCH ANTENNA	4/4

### 3. Test Method

#### 3.1 S11 Measurement



#### 3.2 Direction of Measurement

