

Uma Análise Sobre Antenas Internas

Bruno Teixeira - Eng. Eletrônico

bruno@vermont-rep.com

junho 2020

- Antenas Internas

Na era dos equipamentos analógicos, o mais comum era o uso de dispositivos de transmissão por rádio frequência com antenas externas, de bastão, as vezes retráteis para o caso de um eventual ajuste na faixa de frequência de operação de maneira praticamente empírica. Com o passar do tempo e o início da era digital as frequências utilizadas para rádio foram aumentando com a sofisticação dos sintetizadores, reduzindo o comprimento de onda de operação e por consequência a dimensão das antenas.

As antenas passaram então a ter um tamanho fixo e em seguida migraram para o interior dos dispositivos onde reside uma série de complexidades como interferências e acoplamentos. Fatores como esses fazem com que as antenas internas sejam um dos componentes mais delicados na hora de se projetar um dispositivo de rádio frequência.

Por ser um tanto obscuro em complexidade, o trabalho com antenas internas gera uma série de dúvidas tanto na sua aplicação quanto na escolha. Qual antena usar? Antenas externas são melhores que internas? Antenas chip tem vantagem sobre antenas PCB? Esse documento pretende revisar e discutir as principais dúvidas e erros recorrentes dos desenvolvedores de produtos que usam rádio comunicação em aplicações nas tecnologias mais usuais.

- Antena Internas x Antena Externas

Antenas externas ainda são vistas como melhores em desempenho, mas seria essa percepção real ou a análise não leva em conta todos os aspectos? De fato, existem muitos fatores a se analisar, mas em geral elas são bem similares em desempenho às antenas internas, se é claro, a antena interna for bem sintonizada no dispositivo e estiver de acordo com seu perfil. Mas o que isso quer dizer?

Quando adquirimos uma antena externa a sua especificação é clara quanto à impedância de entrada, por exemplo 50 ohms, usando-a de maneira adequada ela será anexada ao produto através de cabos e conectores com pouca variação dessa impedância caso não haja objetos em sua proximidade, o que significa que ela manterá suas características.

Para a antena interna, devido à proximidade com o meio ao redor, o elemento irradiante interage mudando suas características, então, geralmente, ao anexá-la na placa suas características não serão iguais às da especificação que se trata de uma referência, dependendo normalmente de ajustes para reaproximas suas características aos dados de referência. Caso os ajustes sejam realizados no

dispositivo completo (considerando todos seus elementos) a antena estará apta a funcionar de maneira similar a uma antena externa.

Mas no caso da antena interna não existem perdas devido a absorção do case plástico do dispositivo? Sim, da mesma forma que toda antena externa (a não ser que seja metálica) também possui um revestimento de borracha ou ABS para proteção do núcleo metálico.

Uma vantagem da antena externa é sua distância em relação ao resto do dispositivo, o que permite menos perdas de energia por absorção do mesmo, teoricamente aumentando sua eficiência, no caso de uma antena externa de baixa eficiência (materiais com alta taxa de impurezas e fora de sintonia) essa vantagem desaparece.

Outra vantagem das antenas externas é o padrão de irradiação que no caso de antenas monopolo (a grande maioria) será simétrico e o já esperado formato de toróide com ganho direcional lateral.

Por último, podemos citar um dos mais importantes prós das antenas externas: o feedback visual. Uma vez que a antena é visível é mais simples ajustar sua orientação e mantê-la afastada de aparatos que prejudicam sua performance. Todas essas vantagens da antena externa somadas à simplicidade do seu uso vêm na forma de custo da antena, cabos, conectores e também na perda de robustez, compactabilidade e design do produto.

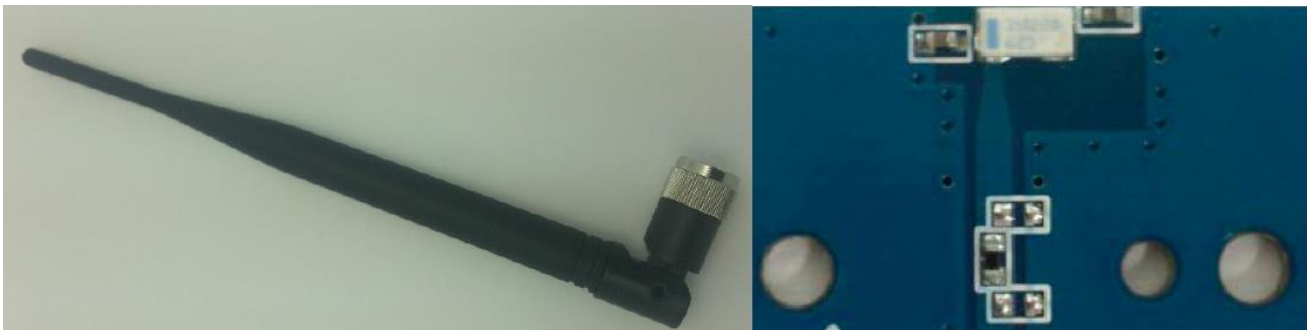


Figura 1 – Antena externa e antena interna respectivamente.

- Antenas Internas Chip x Antenas Internas PCB

Antenas chip são componentes vendidos como antenas encapsuladas e tratadas como tal por boa parte dos desenvolvedores, porém isso é um equívoco, a antena chip não deve ser vista como um componente encapsulado tal como um resistor ou um capacitor.

Se o componente não é uma antena, o que seria? A antena chip é o elemento irradiador da antena e só se torna uma antena realmente uma vez acoplada na placa PCB com dimensões de plano de terra apropriados a sua frequência e *clearance* geométrico de acordo com a suas especificações, no entanto, para fins de simplificação será usado o termo antena para definir o componente nesse documento.

É importante ressaltar que o *layout* ao redor da antena chip (elemento irradiador), normalmente chamado de *clearance* não é só uma área de “respiro” para a irradiação, suas dimensões e forma determinam também a capacitância de acoplamento com o plano de terra e portanto, se for especificado deve ser fiel à documentação, nem maior nem menor.

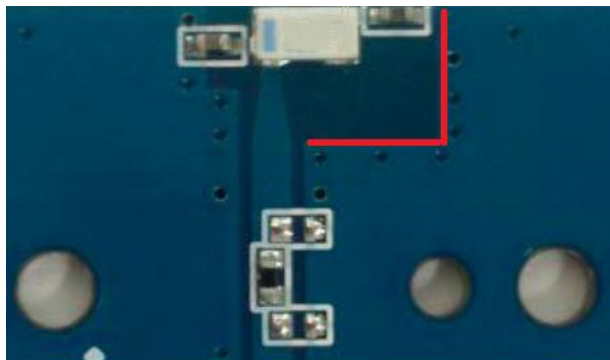


Figura 2 – Área de *clearance* de antena cerâmica em vermelho, parte integrante da antena.

Antenas PCB são antenas impressas no *layout*, muitas vezes usando arquitetura PiFa, dependendo do projeto podem ser tão boas quanto qualquer outra antena, porém, normalmente são cópias de *reference designs* e é aí que reside o perigo. Se a cópia for uma cópia idêntica do *reference* todo do outro dispositivo, talvez o resultado seja similar, caso contrário haverá frustrações.

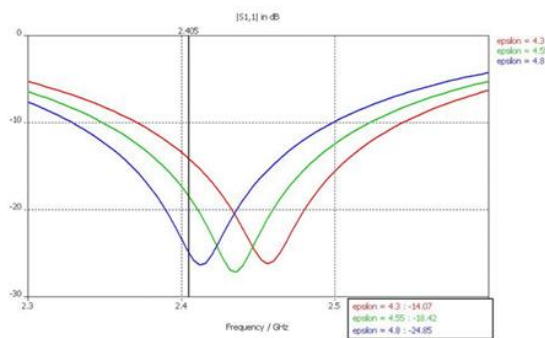


Figura 3 – Variação na sintonia de uma antena PCB de 2.4GHz apenas com a mudança do valor da constante dielétrica.

Para que uma antena PCB tenha boa performance ela deve ser desenvolvida levando-se em conta todo seu entorno, então, em casos onde o desenvolvedor tenha software específico de simulação além de experiência em sintonizá-la de forma adequada, a antena desenvolvida poderá ter bom desempenho.

A antena PCB é completamente plana e coplanar ao plano de terra e por isso é muito sensível ao seu entorno. Seu plano de irradiação pode se tornar extremamente irregular devido a essa sensibilidade, gerando comportamentos inesperados quanto ao enlace de rádio em diferentes posições relativas entre os rádios comunicantes.

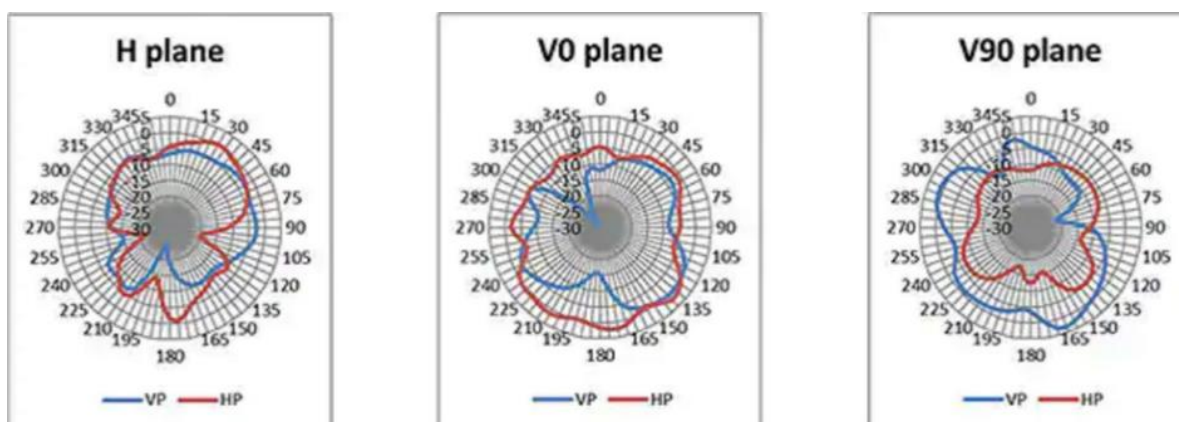


Figura 4 – Padrão de irradiação de uma antena PiFa 2.4GHz.

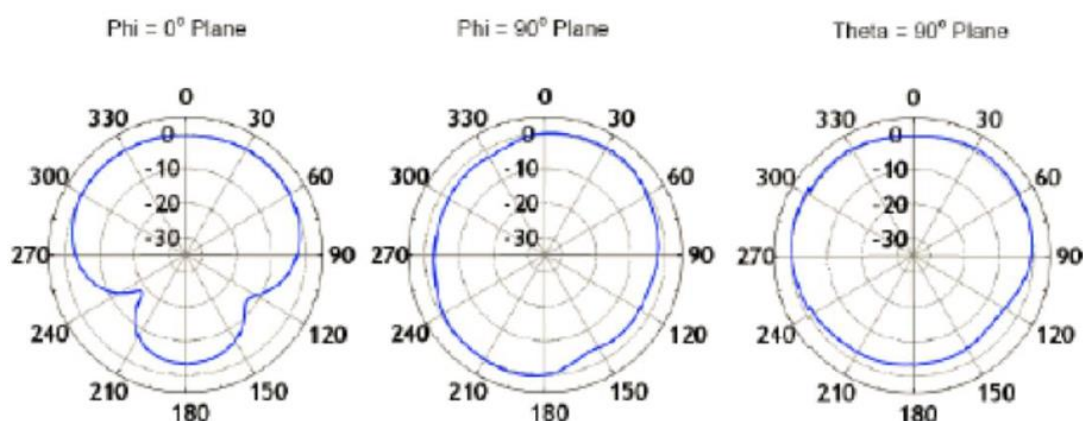


Figura 5 – Padrão de irradiação de uma antena chip cerâmica 2.4GHz.

A antena chip é uma antena tridimensional com material circundante chamado de portadora. A dimensão tridimensional (não coplanar com o terra) e o desenho geométrico da antena, dependendo da metodologia de desenvolvimento, vão garantir certa estabilidade da frequência de operação mesmo em casos de variação do meio ao redor, além disso costumam ter um padrão de irradiação mais uniforme e imunidade a variações como espessura e material da PCB. No caso de uma antena PCB, apenas a mudança de fabricante da mesma placa ou do montador pode desviar a frequência de operação de maneira significativa.

Antenas chip assim como antenas PCB precisam de cuidados na implementação. Quando antenas internas são usadas vários fatores devem ser levados em conta para que possamos nos aproximar do desempenho de referência. Os mais importantes desses fatores são o posicionamento da antena na placa e as dimensões do plano de terra. Se esses fatores não estiverem de acordo com as requisições da documentação haverá uma descaracterização da antena.

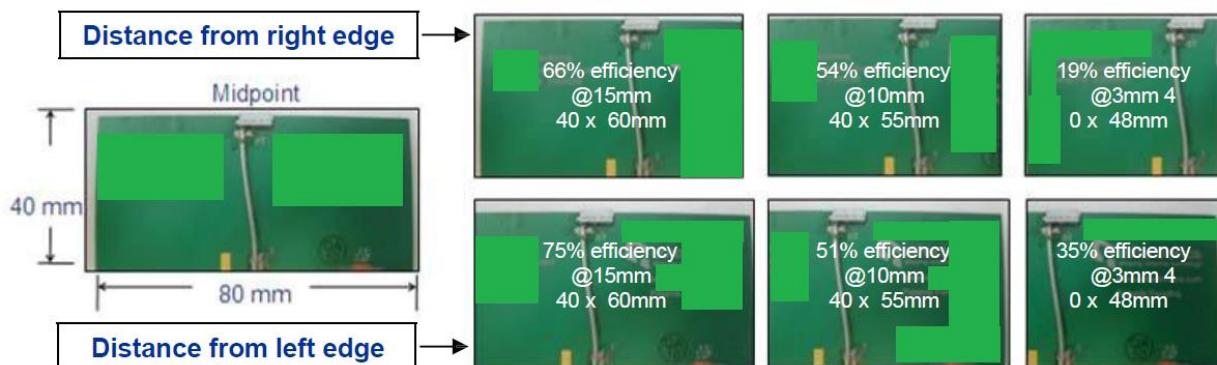


Figura 6 – Estudo da variação da eficiência de uma antena cerâmica projetada para centro de borda em placa de 80x40mm operando em posições e dimensões diferentes.

Na figura acima pode-se notar a variação de performance de uma antena chip apenas com a mudança do plano de terra e da posição de referência.

Outro aspecto importante a ser mencionado diz respeito às dimensões das antenas. Antenas têm suas dimensões definidas por múltiplos do seu comprimento de onda designado como λ , sendo assim a frequência de operação determinará suas dimensões, quanto menor a frequência maior a antena.

Normalmente, monopolos são projetados para $\lambda/4$ (um quarto de comprimento de onda) e para antenas internas (chips ou PCB) não é diferente. Antenas chip podem ser menores que antenas PCB pois são tridimensionais e possuem substrato próprio, o que varia o comprimento elétrico em relação às dimensões físicas. Sendo assim, a questão de limitação nas dimensões se deve às leis da física e não aos fabricantes.

- Parâmetros Importantes em Antenas

Na hora de se escolher uma antena, o primeiro passo é a análise da documentação e os parâmetros do componente. Para antenas internas não é diferente, porém é importante saber que assim como para as antenas externas, as antenas internas tem seus parâmetros medidos em condições ideais, numa placa com plano de terra próprio e livre de acoplamento com outros componentes, ou seja, os parâmetros do datasheet são para referência. Vale ressaltar que grande parte dos fabricantes não acrescentam na documentação as condições em que os parâmetros de referência são válidos.

Return Loss

O *return loss* de uma antena é a fração de potência refletida na entrada da antena por uma certa frequência, ou seja, a parte da potência injetada que retorna por não ser irradiada pela antena.

Normalmente medido em dB, o *return loss* pode ser expresso em termos de porcentagem pela sua própria definição.

$RL = -10\log (Pr/Pin) \Rightarrow Pr/Pin = 10^{(-RL/10)}$, onde:
RL -> return loss; Pr -> potência refletida; Pin -> Potência de entrada;

No caso de um *return loss* de -3dB teremos $Pr/Pin = 10^{(-0,3)} = 0,5 = 50\%$.

Ou seja, para um RL de -3dB temos 50% da energia injetada sendo refletido pela antena naquela frequência sobrando então 50% para ser irradiada, absorvida, dissipada pela antena.

Para -6dB teremos um *return loss* de 25% e para -9dB teremos um *return loss* de 12,5%. Sabendo disso, o interessante é que esse parâmetro seja menor que -9dB na faixa onde se deseja trabalhar, não chega a ser uma regra pois como veremos a seguir existem muitos parâmetros a se analisar, mas não deixa de ser uma boa referência.

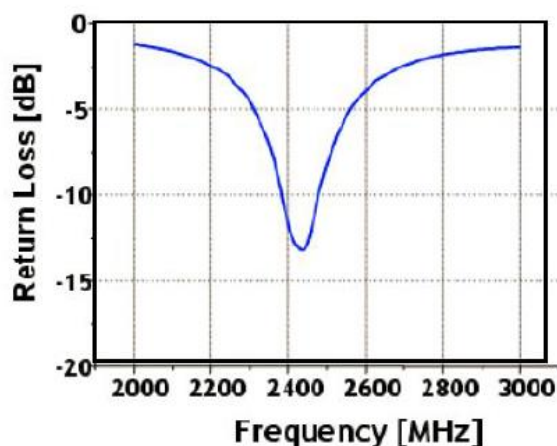


Figura 7 – Curva de *return loss* de uma antena cerâmica de 2.4GHz.

SWR (*Standing Wave Ratio*)

A potência refletida na entrada da antena retorna pela guia de onda causando interferência construtiva/destrutiva no sinal emitido formando uma onda estacionária.

O coeficiente de onda estacionário, SWR em inglês, é um parâmetro que visa a análise da reflexão pelas amplitudes da onda estacionária na entrada da antena, o que nada mais é que a análise do *return loss* sob outro ponto de vista.

O SWR é a razão entre a máxima e a mínima amplitude da onda estacionária formada pela soma do sinal transmitido e o sinal refletido pela antena sendo seu valor ideal a unidade que é o valor do SWR quando não ocorre reflexão nenhuma.

Em termos práticos, para antenas procura-se um SWR menor que 2 em toda a faixa de operação, contudo, em antenas com muitas faixas de frequência ou banda muito larga é aceitável (e funcional inclusive) valores menores que 3 em partes da faixa de operação.

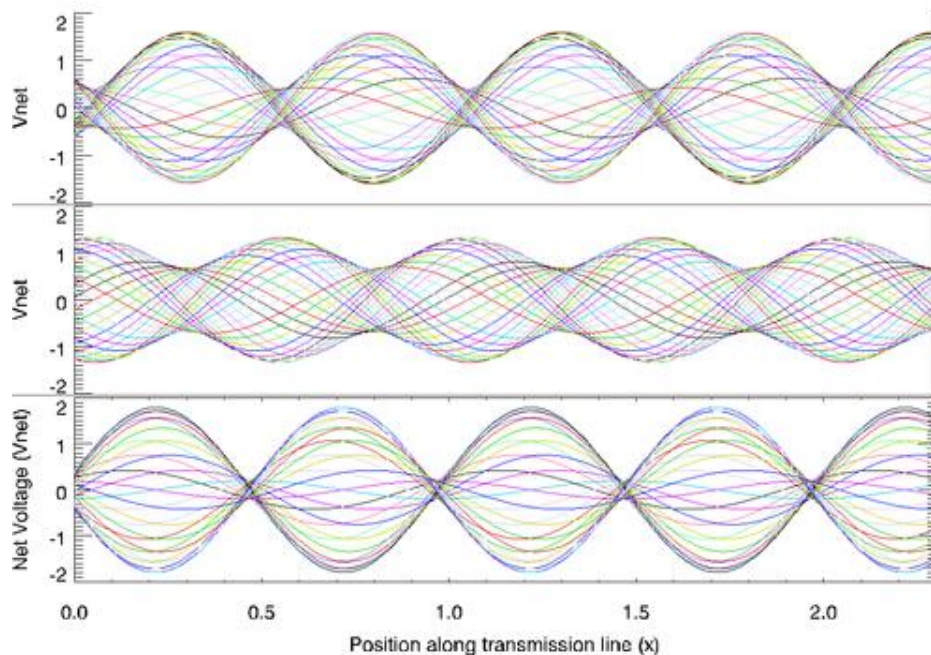


Figura 8 – Visualização de onda estacionária. SWR = 4; SWR = 2 e SWR = 9 respectivamente.

Eficiência

Sabendo que o *return loss* é a fração da potência refletida na entrada da antena podemos admitir então que o restante, a potência transmitida foi toda irradiada? A resposta é não. Parte da energia (uma boa parte) é dissipada em calor e absorvida pelo próprio material da antena e dos elementos ao seu redor que se acoplam a antena.

É difícil definir a eficiência da antena (como componente) pois a potência irradiada dependerá de uma série de fatores ligados ao dispositivo como: a proximidade dos componentes da antena, o material e a proximidade do invólucro do produto e acoplagem da antena ao seu plano de terra. Assim, a eficiência é um parâmetro mais realista se relacionado ao produto final e não à antena exclusivamente.

A eficiência poderia ser definida então como:

$$E_f = P_{irr}/P_{in} = (P_{in} - P_r - P_p)/P_{in}, \text{ onde:}$$

E_f -> Eficiência; *P_r* -> potência refletida; *P_{in}* -> Potência de entrada; *P_p* -> Potência perdida

Para se medir a eficiência é preciso auxílio de aparelhos anecóicos que podem medir o valor absoluto da potência do sinal irradiado (TRP) ao longo de toda a esfera de irradiação que cerca o dispositivo.

Existem antenas chips ditas “*on ground*” (não possuem *clearance* algum) que são muito atraentes em custo, porém essas antenas são projetadas para uso em dispositivos que obrigatoriamente operam em superfícies metálicas. Por esse motivo essas antenas apresentam eficiência entre 10% e 30%.

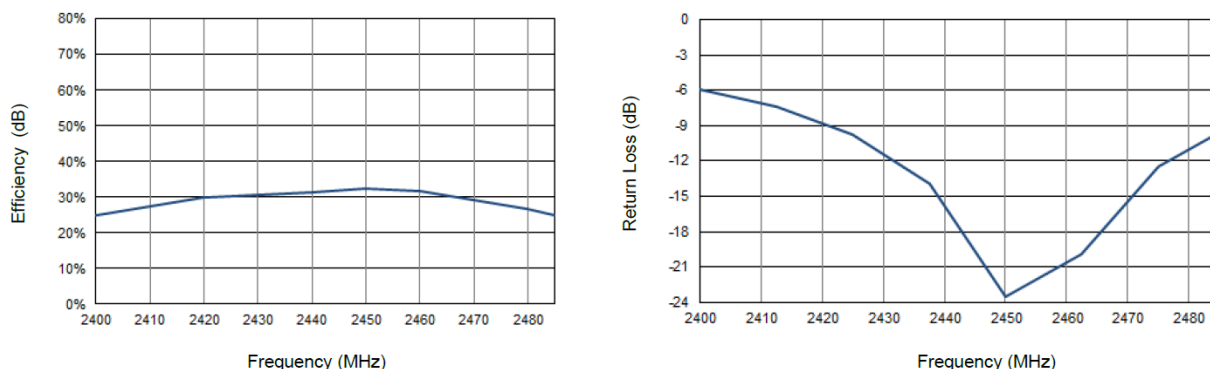


Figura 9 – Eficiência de antena *On Ground* em 2.4GHz.

O que visualizamos na figura acima, onde mesmo com a antena tendo baixa reflexão (baixo SWR) na faixa de operação, tem-se baixa eficiência pode ocorrer também para antenas *off ground* e por isso a importância do parâmetro de eficiência. Se na documentação do componente não constam informações sobre a eficiência deve-se ter consciência de que não se sabe o que esperar da performance.

Antenas monopolo (de boa qualidade) sejam externas ou internas costumam na prática apresentar eficiência de 30-65% para frequências sub-giga e 40-80% para frequências acima de 1.7GHz considerando que estejam bem ajustadas no dispositivo.

Diagrama de Irradiação

O diagrama de irradiação representa o quanto a antena irradia em cada direção. A antena dita isotrópica é um modelo ideal onde a antena não tem dimensões e é representada por um ponto com irradiação uniforme em todos os sentidos tendo como padrão de irradiação uma esfera.

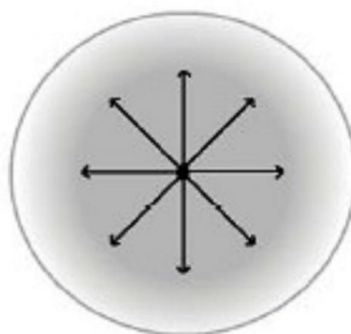


Figura 10 – Representação da antena isotrópica (esfera).

O diagrama de irradiação costuma ser apresentado na documentação da antena em 2 opções: de forma tridimensional ou em 3 planos, sendo cada um a representação de um corte dos planos ortogonais do modelo tridimensional.

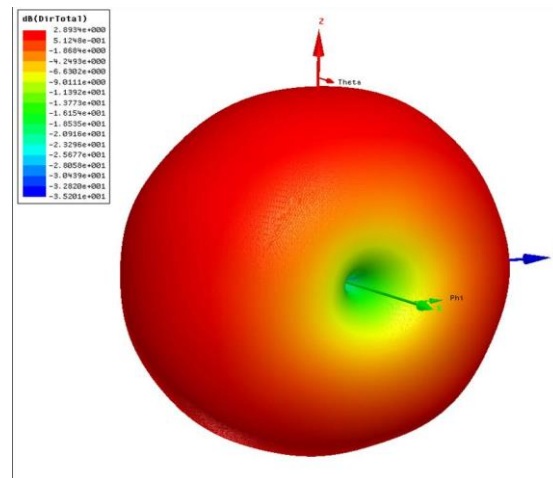


Figura 11 – Diagrama de irradiação 3D de uma antena, intensidade representada por cores.

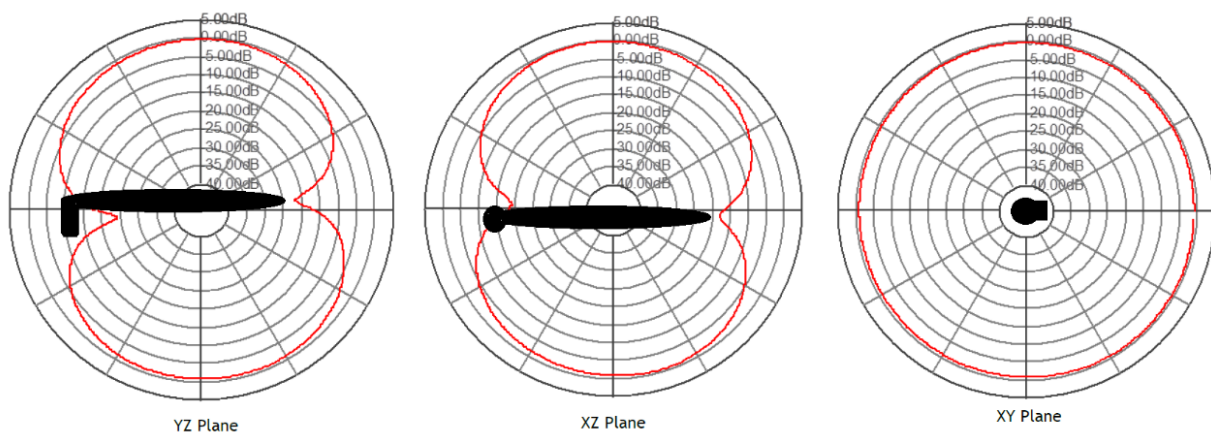


Figura 12 – Diagrama de irradiação de antena monopolo representada em planos ortogonais.

Ganho de Pico (*Peak Gain*)

Um dos maiores equívocos em parâmetros de antenas é o significado do parâmetro “ganho de pico” pois parte dos incautos relaciona maior ganho à melhor qualidade da antena, porém deve-se entender que ganho de pico está relacionado a diretividade da antena e não tem relação com performance.

Antenas quando não ditas ativas, são componentes passivos, ou seja, não apresentam ganho ativo de energia. Então, o que é o ganho de pico de uma antena? No caso da antena isotrópica, temos toda a potência de entrada na antena irradiada uniformemente e como a antena é passiva ela não criará energia e, portanto, a potência irradiada será exatamente igual a potência de entrada levando a um ganho de pico de 0dBi onde “i” designa que o ganho é em relação ao irradiador isotrópico.

Vamos analisar o caso de um monopolo simples e seu padrão de irradiação:

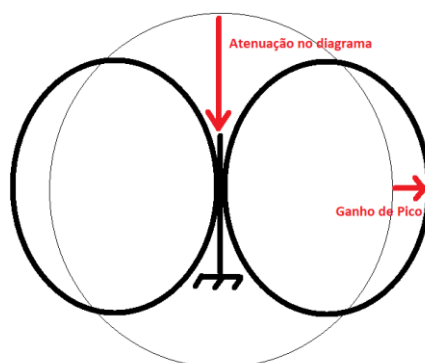


Figura 13 – Ganho de pico de uma antena monopolo em relação a antena isotrópica (referência em cinza).

Vemos que o ganho de pico então é o maior valor possível no diagrama que sobressai ao modelo isotrópico podendo ser em um plano ou até mesmo em um ponto específico.

Se então analisarmos uma monopolo de alto ganho teremos o seguinte esquema:

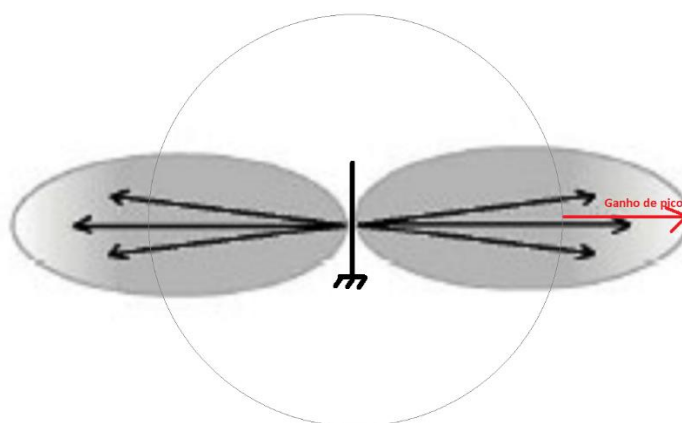


Figura 14 – Antena monopolo de alto ganho em relação a antena isotrópica.

Na figura acima temos uma antena que apresenta diretividade no sentido lateral e nesse sentido temos um alto ganho em relação ao irradiador isotrópico dado em dBi's no plano horizontal. Note que esse ganho não é gratuito, para que a diretividade aconteça outras áreas terão ganho negativo (atenuação), ou seja, se por um lado a antena da figura é melhor do que a isotrópica no enlace horizontal, por outro lado ela não apresenta enlace vertical significativo e atenuação na maior parte do seu padrão de irradiação.

Outro caso seria uma antena parabólica, seu ganho é extremamente alto ultrapassando os 30dBi, porém só tem um lóbulo significativo com direcionalidade no sentido do seu foco, em compensação não apresenta praticamente enlace em qualquer outra direção.

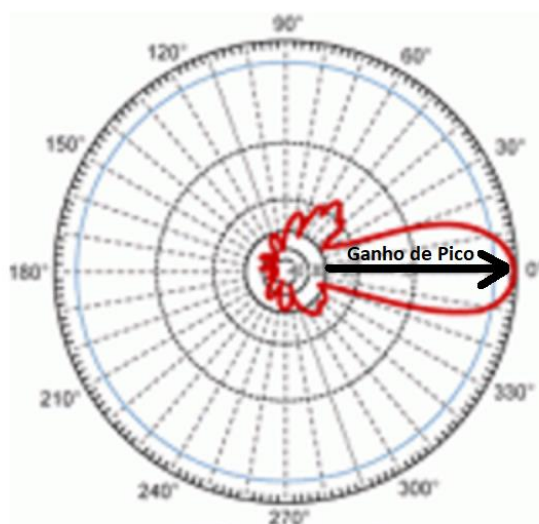


Figura 15 – Padrão de irradiação de antena parabólica (Altíssimo ganho).

Isso significa que alto ganho só é vantajoso em situações em que a posição relativa dos elementos comunicantes é conhecida ou previsível, senão o enlace será prejudicado toda vez que os dispositivos se desalinharem do plano de enlace.

Um grande problema é que existem fabricantes que se aproveitam da interpretação entre “ganho” e “ganho de pico” e usam apenas o termo “Ganho”, como saber então a diferença? É simples: O ganho de pico será dado em dBi e o ganho real (antenas ativas) será em dB.

Como então fica o caso de antenas internas?

As antenas internas normalmente não têm um padrão de irradiação tão simétrico em todos os planos se comparado a um monopolo ou ao irradiador isotrópico como no exemplo abaixo:

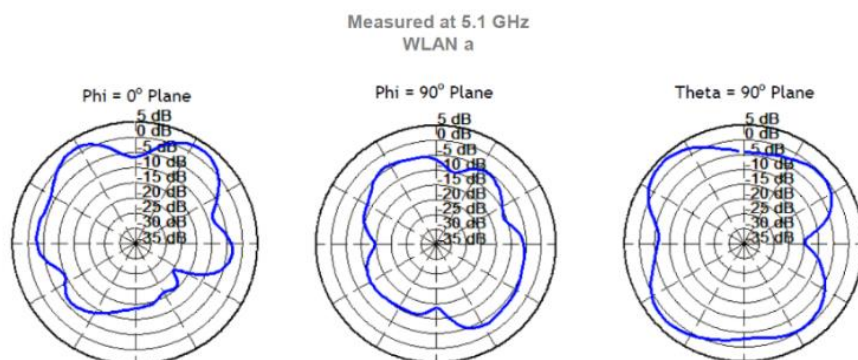


Figura 16 – Padrão de irradiação de antena cerâmica com assimetrias em 5.1GHz.

A tendência de uma antena interna é apresentar um padrão de irradiação não uniforme, similar a uma esfera que teve deformações em algumas direções. O que vai determinar o padrão de irradiação da antena interna são os vários fatores de acoplamento entre o elemento irradiador e a placa onde ela se encontra principalmente no plano onde está a própria placa.

Sendo assim, o ganho de pico de uma antena interna é uma pequena faixa ou até mesmo um ponto exclusivo de diretividade fazendo desse parâmetro um valor praticamente inútil sem a análise do padrão de irradiação.

No caso dos dispositivos de uma rede numa central de alarme por exemplo, não se sabe em qual direção relativa serão instalados a central e os sensores. Podemos ter elementos horizontais numa casa e verticais num sobrado ou prédio. O ideal, portanto, seria a busca por padrões de irradiação uniformes de baixo ganho.

Conclui-se então que se a arquitetura da solução de enlace para os dispositivos possui posição relativa desconhecida, o desejável é que o padrão de radiação se aproxime da antena omnidirecional a qual consequentemente terá ganho de 0dBi ou até mesmo negativo em prol de um padrão mais uniforme.

Em antenas externas monopolo é aceitável que não haja o padrão de irradiação na documentação, pois nessas antenas o padrão esperado é o formato toróide habitual e o ganho de pico representa o ganho lateral, porém isso não se aplica às antenas internas.

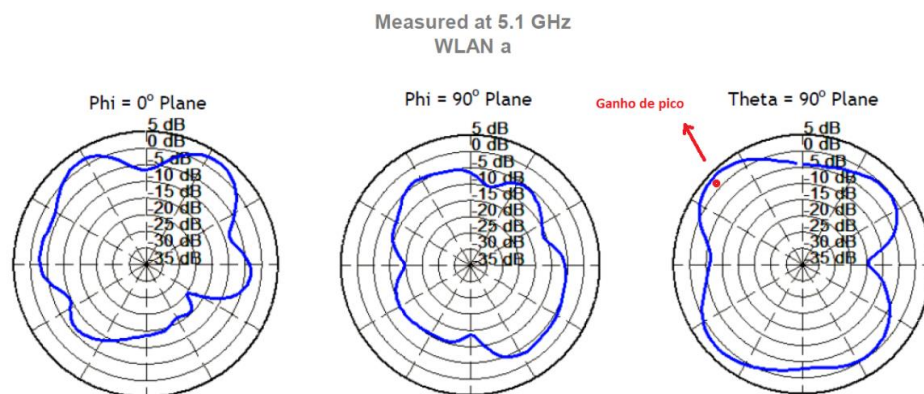


Figura 17 – Ganho de Pico de 3.2dBi numa antena de 5.1GHz (um ponto em um dos planos).

Ganho (*Gain*)

Para antenas ativas é possível falar em ganho real, nesse caso a antena possui um mecanismo ativo, normalmente composto de um PA (*Power Amplifier*) e um LNA (*Low Noise Amplifier*) que amplificam o sinal de transmissão e recepção respectivamente em troca de consumo de energia.

Nesse caso se o ganho ativo da antena for de 10dB, significa que o PA ampliará em 10dB o sinal antes de irradiá-lo aumentando assim em 10dB a potência do sinal em todas direções do padrão de irradiação. Se possuir LNA, este ampliará o sinal de recepção antes de entrega-lo ao rádio aumentando assim a sensibilidade relativa.

Para antenas GPS é comum encontrar antenas patch ativas e que, portanto, possuem LNA integrado.

Circuito de Casamento de Impedância (*Matching Circuit*)

Também conhecido como “filtro pi” pela forma dos 3 componentes na base do feed da antena, o circuito de casamento é o espaço para adição de uma carga em associação com antena que seja capaz de corrigir eventuais desvios da sua impedância de especificação.

Como dificilmente as dimensões de plano de terra e posição da antena serão iguais os da referência, a impedância da antena poderá sofrer desvio que precisará ser corrigido para correta operação. Nesse caso, o uso de uma carga complementar pode resolver o problema dependendo da magnitude do desvio e essa é justamente essa a função do circuito de casamento.

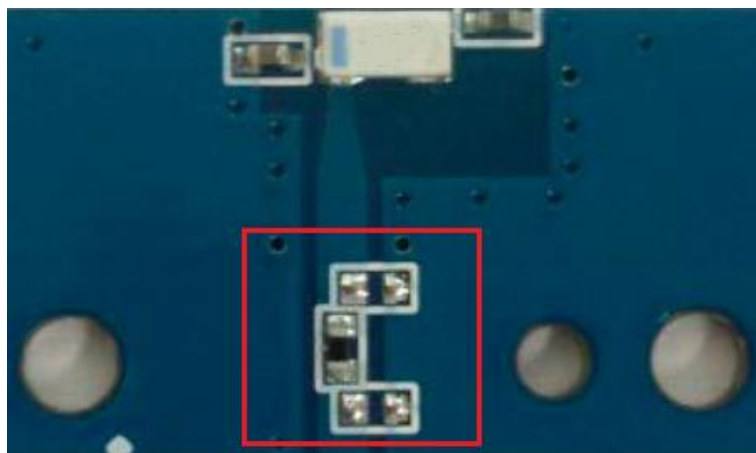


Figura 18 – Circuito de casamento de impedância em vermelho.

O valor dos componentes dependerá do valor que a impedância de entrada da antena adquiriu quando acoplada no dispositivo e somente sua leitura através de VNA (*Vector Network Analyzer*) e cálculo de casamento através de uma Carta de Smith poderão determinar os valores ótimos para ajuste.

Carta de Smith

A carta de Smith é uma ferramenta para visualização gráfica da impedância de uma carga de acordo com a frequência do sinal aplicado a esta. No caso de antenas, é possível a análise da variação de impedância de entrada e a estabilidade dentro da faixa de operação.

Na figura 19 podemos ver na linha verde os valores de impedância assumidos de 800MHz a 1GHz por uma antena de 915MHz. A faixa de operação desejada é a faixa de 902-928MHz, a qual 915MHz é o centro da faixa e é representado pelo marcador 1 na Carta de Smith que possui no seu centro o valor de referência de 50 ohms. Nesse exemplo, a impedância no centro da faixa é de $Z = 50.2 + 6j$ ohms.

Os valores da Carta não são parâmetros úteis de especificação, uma vez que esses pontos vão variar de acordo com cada projeto, porém é a ferramenta ideal para se determinar os valores dos componentes do filtro de casamento mencionado no item acima.

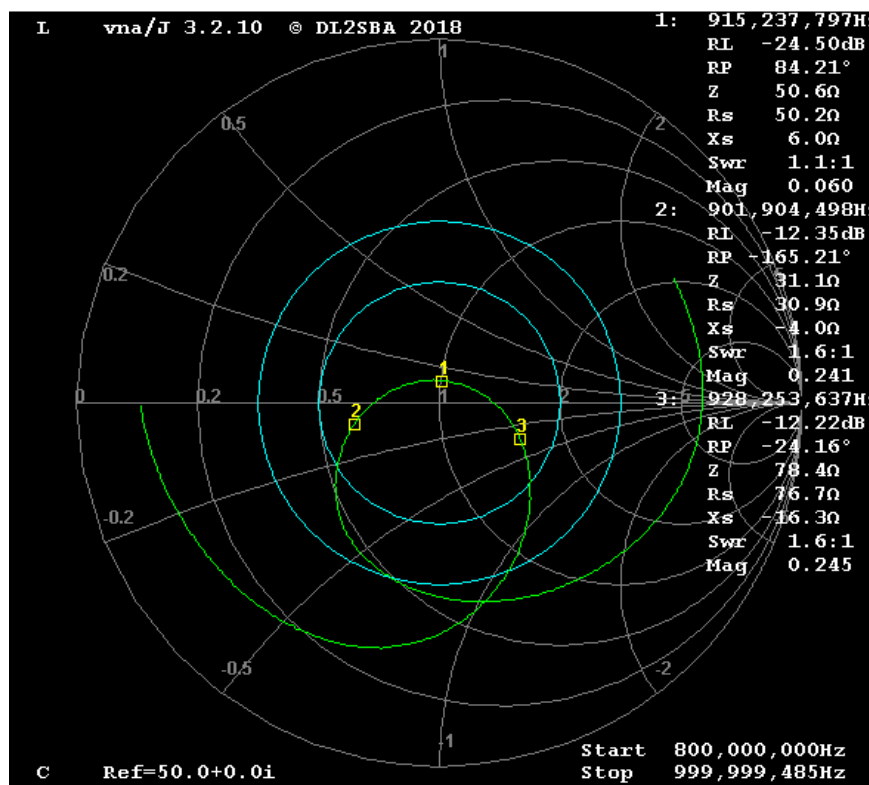


Figura 19 – Representação da impedância de uma antena de 915MHz na Carta de Smith.

Como Escolher Uma Antena Para o Projeto?

As questões mais relevantes na hora de escolher a antena são:

Quais frequências de comunicação serão usadas?

Para melhor eficiência com monopolos (PCB, chip ou externa), as dimensões do dispositivo devem ser compatíveis com o comprimento de onda das frequências utilizadas para comunicação, ou seja, planos de terra pequenos e baixas frequências não combinam com monopolos.

Quais as dimensões desejo para meu produto?

Para baixas frequências é necessário maior plano de terra para maior eficiência, ou seja, caso o dispositivo vise ser menor que as dimensões adequadas foque na qualidade das antenas e do layout de rádio frequência para extrair o melhor possível de performance que a física permite.

Quais as distâncias envolvidas?

Em caso de grandes distâncias, a análise do padrão de irradiação pode favorecer o enlace de rádio, nesse caso o estudo da diretividade das antenas a serem usadas é essencial.

Qual a posição relativa em geral dos dispositivos?

Se os elementos da rede de comunicação são fixos então o padrão de irradiação deve ser analisado de maneira a otimizar o enlace verificando qual a melhor posição do dispositivo e da antena na rede.

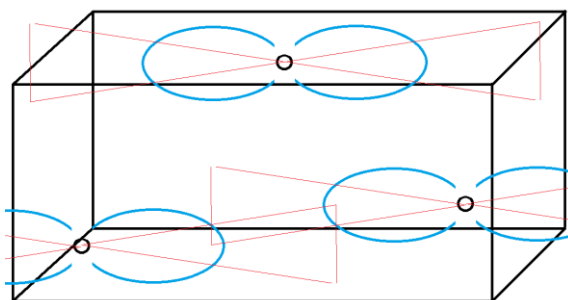


Figura 20 – Exemplo de rede onde o enlace não é favorecido pela alta diretividade.

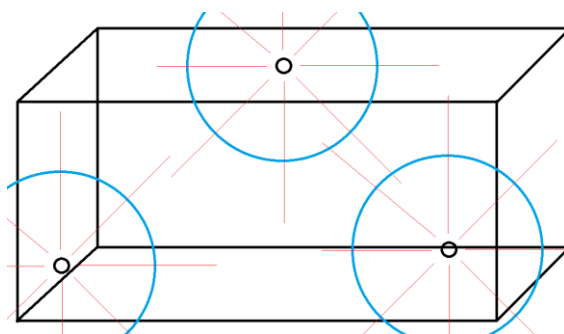


Figura 21 – Exemplo de rede favorecido pela baixa diretividade.

Em caso de mobilidade, a melhor alternativa é a busca por padrões de irradiação uniformes para que o enlace não varie com a posição relativa dos elementos da rede.



Figura 22 – Exemplo de uso de combinação de antenas diretivas e omnidirecionais que favorecem o enlace.

Analise a solução como um todo, em casos de rede complexas a melhor configuração pode ser uma combinação de vários elementos diferentes como visto na figura 22.

Conclusão

O uso das antenas internas se comparado às antenas externas aumentou muito a complexidade de implementação, no entanto, reduziu o custo, melhorou o design, a robustez e as dimensões dos dispositivos de rádio frequência. A gama de opções e fabricantes de antenas internas é extensa e normalmente o custo é um dos pontos em maior discussão. Vale ressaltar novamente que antenas-chip não devem ser vistas como capacitores ou resistores, mas se assim o forem, devem ser tratados como componentes de baixíssima tolerância.

O uso de antenas PCB sem as ferramentas de simulação adequadas ou antenas internas de baixa qualidade para redução de custo são na maioria das vezes sinônimo de retrabalho. Retrabalho que muitas vezes acaba levando a mais retrabalho e muitas vezes termina numa migração para uma antena de qualidade ou num produto que deixa a desejar. Em ambos casos, houve custo de retrabalho e atraso no projeto que somados são sempre maiores do que o a economia da opção de melhor qualidade além, é claro, de toda a frustração desnecessária.

O custo mais alto de antenas internas de qualidade reside em três principais fatores:

- 1 - Na tecnologia do design da estrutura interna cujo desenho geométrico visa imunidade de acoplamento a elementos próximos;
- 2 - Na pureza do material da portadora, seja cerâmica, FR4 ou FPC que garantem maior estabilidade e absorção com melhor eficiência;
- 3 - Na qualidade da tecnologia de injeção desses materiais que visa garantir as dimensões geométricas da estrutura interna nos mais variados processos de montagem para que assim seja possível garantir reprodutibilidade dos resultados em cada um dos dispositivos numa produção em escala;

Por fim vale ressaltar que o suporte oferecido é de extrema importância já que tanto o conhecimento quanto o auxílio de aparelhos de medição em alta frequência são escassos para alguns desenvolvedores de tecnologia.

Nota Final

Esse documento visa apenas dar um vislumbre básico para a infinidade de variáveis que rondam a escolha de uma antena para uso em projetos de comunicação de rádio frequência. Existem ainda muitas outras variáveis que não foram abordadas nesse documento como por exemplo:

- Ajuste de antenas multibanda (3G, LTE);
- Polarização (linear, circular);
- Isolação de antenas de mesma frequência operando no mesmo dispositivo;
- Dispositivos MIMO onde existe comunicação multiplexada;
- Antena *diversity*;
- Análise de EMI (*Electromagnetic Interference*) no dispositivo;
- TIS (*Total Isotropic Sensitivity*);

Esses e outros temas poderão vir à tona dependendo da tecnologia e da topologia de rede e do projeto sendo importante o estudo dos mesmos e o suporte dos fornecedores dos componentes relacionados.