

1

Introdução à Eletrônica de Radiofrequência

1 – O que é RF

Tecnicamente o conceito de radiofrequência (RF) não é fixo ou absoluto. Mesmo embora as vezes se queira atribuir uma faixa fixa de frequência onde se diz ser RF, entende-se hoje segundo alguns autores¹ que RF é muito mais do que uma faixa e sim um conjunto de técnicas de projeto e/ou análise que se aplicam a circuitos ou sistemas onde:

- A reatância do circuito e de seus componentes varia significativamente com a frequência do sinal com que este circuito trabalha devido aos componentes parasitas que passam a ser agora perceptíveis e/ou ao efeito pelicular (que será visto mais à frente neste capítulo) que também contribui muito na degradação das características dos componentes (resistores, capacitores, indutores, transistores, etc) tanto passivos quanto ativos;
- Começa a aumentar a degradação do fator de qualidade Q , as perdas e a presença de ruído térmico que aparecem com maior significância;
- A acoplamento magnético entre componentes de um circuito ou a radiação eletromagnética entre estes elementos fazendo com que eles sejam afetados sensivelmente;
- Reflexões de sinais causadas por descasamentos de impedâncias ou devido ao tamanho dos circuitos e comprimentos de ondas que são empregadas na aplicação. Nestes casos é necessário um tratamento especial a estes sinais para garantir que as reflexões sejam minimizadas ou que não acarretem em perdas de potência ou ineficiência de transmissão ou recepção de sinais.
- A não linearidade dos componentes eletrônicos começam a ser bem perceptíveis e causam distorções nos sinais criando frequências indesejadas em suas saídas que prejudicam a aplicação.

Em virtude das dificuldades listadas anteriormente, o **projeto de circuitos de RF** pode ser melhor caracterizado como ‘*um conjunto de técnicas ou procedimentos capazes de lidar com estes efeitos em uma dada aplicação*’ do que por uma faixa de espectro. Isto quer dizer que entende-se por projeto de RF não necessariamente o trabalho com uma faixa específica de frequência, mas sim pelo uso de técnicas específicas que tratam os problemas descritos anteriormente ainda que elas possam ocorrer em frequências muito baixas mas que mesmo assim o projetista deseja trata-las. Mesmo assim, alguns autores ainda insistem em tratar ou

¹ Gupta, M. “What is RF?”. IEEE Microwaves Magazine, pp. 12-16, 2001.

definir circuitos de RF como aplicações que trabalham com sinais que variam de uma faixa de frequência compreendida aproximadamente entre 9kHz a 300GHz² conforme ilustração da figura na sequência.

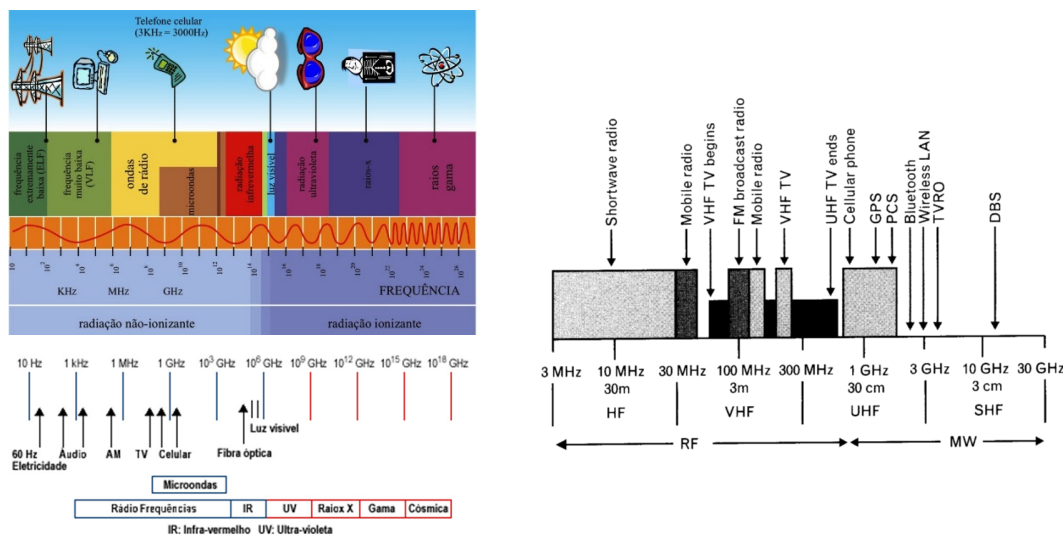


Figura 1 – Ilustração da faixa de frequência do espectro eletromagnético que pode variar de fonte para fonte. Mas a designação do espectro para algumas aplicações é fixa (dentro de um determinado país) e normatizada por órgãos nacionais ou internacionais.

Geralmente, em frequências mais baixas (na ordem de kHz), os circuitos e componentes elétricos tem seu funcionamento mais facilitado e os modelos de uso também são mais simples. Porém, a medida que se aumenta a frequência, complicações aparecem exigindo-se mais esforço e modelos mais sofisticados para incorporar as imperfeições e dar a elas uma solução. Contudo, como a modernidade exige mais capacidade de comunicação, emprega-se cada vez mais bandas mais altas do espectro exigindo-se dos equipamentos eletrônicos maior sofisticação em seu projeto para lhe dar com estes fenômenos (quase sempre indesejados) que acontecem nos componentes eletrônicos à medida que a frequência com que trabalham aumenta. Hoje, por exemplo, é comum vermos aparelhos celulares operando de bandas que vão de 800Mhz até 2GHz.

2 – Componentes discretos e monolíticos em RF

Os componentes discretos ou monolíticos³ tem, a princípio, algumas de suas características fixas. Por exemplo, um resistor de $1\text{M}\Omega$ deve ter uma impedância de $1\text{M}\Omega$. É pelo menos o que esperamos. Contudo, isto nem sempre acontece. Capacitores em determinadas frequências podem não ser capacitores e podem passar a se comportar eletricamente como indutores mesmo embora sejam fisicamente capacitores. Assim, as propriedades físicas que caracterizam os componentes, como resistências, capacitores e indutores nas

² Esta faixa de valores pode variar de autor para autor. Alguns, por exemplo, sugerem a faixa de 1MHz até 30GHz. Neste material usamos como referência a maior faixa encontrada para cobrir a maior quantidade possível de casos.

³ Entende-se por monolíticos o componente que é formado por um conjunto rígido que é indivisível. Por exemplo, mesmo embora um amplificador operacional LM741C possa ser decomposto funcionalmente em vários transistors, ele vem em um encapsulamento que o torna um só componente indivisível.

radiofrequências, podem mudar segundo a frequência. Mas por que isto acontece? A resposta para isto está em sua maior parte no dito efeito “pelicular”

2.1 – Efeito pelicular

Um condutor, em baixas frequências, utiliza toda a sua área de seção transversal para transporte de cargas elétricas. A medida que a frequência aumenta, um campo magnético no centro do condutor aumenta criando uma impedância para as cargas. Em consequência disto, diminuindo a densidade de corrente no centro do condutor e aumentando a densidade de corrente em torno do seu perímetro. Esta densidade de corrente aumentada na borda do condutor é conhecida como **efeito pelicular** (*skin effect*). Isso ocorre em todos os condutores, incluindo cabos de resistência, capacitores, indutores, etc.

O resultado do efeito pelicular é uma diminuição efetiva na área transversal do condutor e, portanto, um aumento na resistência AC do condutor. Como a corrente no condutor é uma corrente alternada, este campo magnético está em expansão e contração alternada e, portanto, produzindo uma tensão no fio que se opõe a qualquer alteração no fluxo de corrente. Essa oposição à mudança é chamada de **auto indutância** e chamamos qualquer coisa que possua essa qualidade de indutor. A indutância de fio reto pode parecer trivial, mas, como se verá mais adiante, quanto mais alta a frequência que passa por ele, mais importante se torna este efeito.

2.2 - Resistores

A resistência é uma propriedade de um material que determina a velocidade na qual a energia elétrica é convertida em energia térmica para uma determinada corrente elétrica. As resistências são usadas em todos os lugares nos circuitos. No entanto, pouco se avalia como um resistor se comporta em AC para maiores frequências.

O circuito equivalente de um resistor em radiofrequências é mostrado na figura seguinte onde R é o próprio valor do resistor, L e C são, respectivamente, a indutância e a capacitância parasitas que variam de resistor, material de composição, fabricante dentre vários outros fatores. Geralmente, até 10Mhz (este valor pode variar bruscamente) as componentes parasitas de L e C são insignificantes.

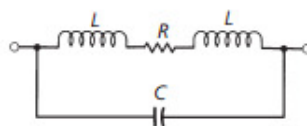


Figura 2 – Circuito equivalente de um resistor.

O efeito mais significativo destes componentes L e C de um resistor é o surgimento de um pico de impedância (ou ressonância⁴) conforme ilustra a próxima figura. Qualquer aumento adicional na frequência fará com que a impedância do resistor diminua não sendo este um valor constante, como se esperava e se

⁴ O Fenômeno de ressonância é muito usado em RF e por isto será abordado em capítulo separado deste material.

usava em análises DC. Este tipo de fenômeno acontece em resistores de materiais menos elaborados (de fio bobinado, carvão, etc).

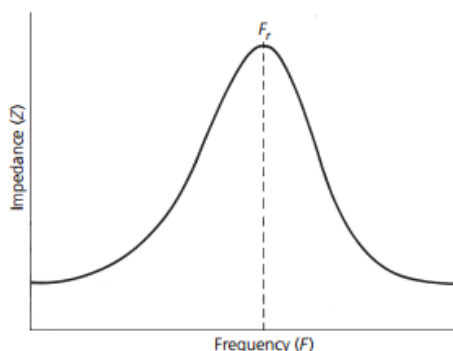


Figura 3 – Curva de impedância característica de um resistor de fio bobinado comum.

Vale destacar que para já resistores de melhor qualidade como os de filme metálico, por exemplo, suas características variam menos em frequência. Isto quer dizer que os componentes parasitas indesejados têm valores menores (até mesmo desprezíveis, dependendo da frequência em análise). A figura seguinte mostra alguns valores de resistores e sua variação de impedância com o incremento da frequência.

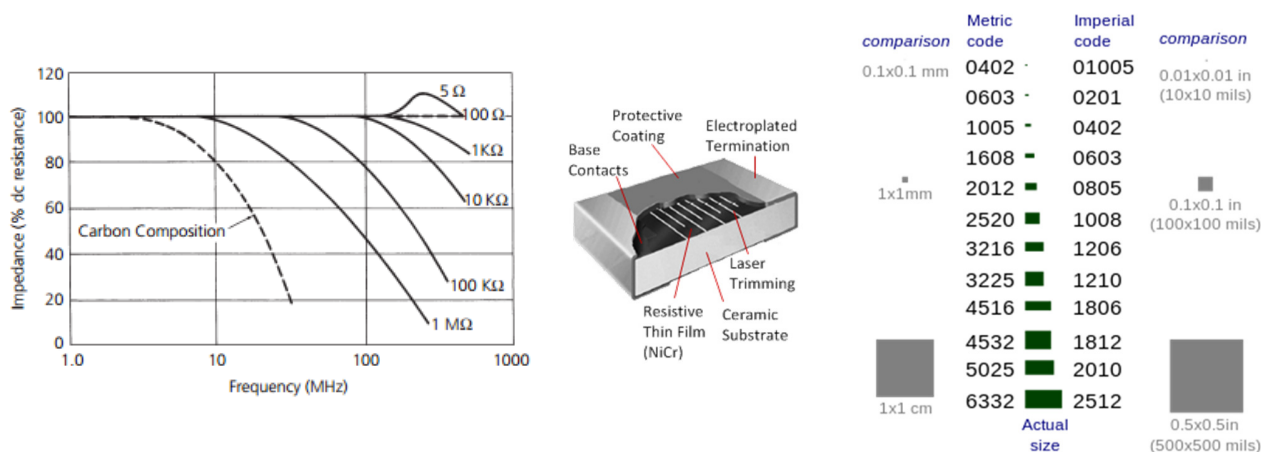


Figura 4 – *Esquerda*: características de frequência entre resistores de filme metálico (menos susceptíveis a variação de impedância com aumento da frequência) e de composição por carbono (maiores variações). *Centro*: ilustração de um resistor de filme fino com encapsulamento SMD. *Direita*: dimensões padrões de componentes SMD;

Atualmente, para circuitos mais precisos na área de RF, a tendência tem sido o uso de resistores com reduzidas reatâncias dispersas (parasitas) que fazem variar o valor da impedância. Isto facilita a vida do projetista que não tem mais que se preocupar tanto com os efeitos de frequência em cada componente individual do circuito. A título de mera ilustração, o leitor pode consultar no exemplo 1.3 da referência (Bowick, 2007) os cálculos que estimam que um resistor convencional de 10kΩ nominais (ou medido em nível DC), tem para operação em 200MHz, impedância de 2,5kΩ (ou seja: cai a ¼ do seu valor nominal).

2.3 - Capacitores

Os capacitores são amplamente utilizados em aplicações de RF tais como bypass, acoplamento intermédio, filtros, etc. É importante lembrar, no entanto, que nem todos os capacitores se prestam igualmente a cada uma das aplicações mencionadas. A tarefa principal do projetista de circuitos de RF, no que diz respeito aos capacitores, é escolher o melhor capacitor para sua aplicação específica. A eficácia dos custos geralmente é também um fator importante no processo de seleção. O uso de um capacitor depende principalmente das características do seu dielétrico. As características do dielétrico também determinam os níveis de tensão e os extremos de temperatura em que o dispositivo pode ser usado. Assim, quaisquer perdas ou imperfeições no dielétrico têm um efeito enorme na operação do circuito.

A título de revisão, o capacitor é um dispositivo que consiste em duas superfícies condutoras separadas por um material isolante ou dielétrico. O dielétrico geralmente é cerâmico, ar, papel, mica, plástico, filme, vidro ou óleo. A capacitância de um capacitor é aquela propriedade que permite o armazenamento de uma carga quando existe uma diferença de potencial entre os condutores. Um capacitor de 1 Faraday é aquele que com uma diferença de potencial de 1 Volt entre seus terminais, acumula entre suas placas uma carga de 1 Coulomb conforme relação abaixo:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{0.2249 \cdot \epsilon \cdot A}{d \cdot \epsilon_0} \cdot 10^{-12} \text{ Farads}$$

Se conhecemos a área (A) de cada placa de metal, a distância (d) entre a placa e a permissividade (ϵ) do material dielétrico, podemos conhecer sua capacitância. Lembrando que ϵ_0 = permissividade de espaço livre = 8.854×10^{-12} F/m. A relação $\epsilon/\epsilon_0 = k$. Para uma mesma capacitância, um capacitor com k mais elevado tem menor tamanho (o valor de k possibilita a diminuição do parâmetro d da fórmula anterior).

Assim como o caso do resistor, o capacitor também tem um modelo para RF onde são considerados alguns componentes no seu comportamento em frequência. Este modelo é mostrado na figura da sequência. Nele, C é igual à capacitância, R_s é a perda de dissipação de calor expressa como fator de potência (PF) ou como fator de dissipação (DF), R_p é a resistência de isolamento e L é a indutância dos fios e placas.

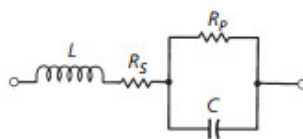


Figura 5 – Circuito equivalente de um capacitor para comportamento em RF.

Na sequência são listados alguns dos parâmetros mais específicos de um capacitor para seu comportamento em RF. São eles:

- Fator de potência (PF): em um capacitor perfeito, a corrente alternada levará a tensão aplicada em 90° . Este ângulo de fase (ϕ) será menor em um capacitor real devido à resistência total da série ($R_s + R_p$). Assim, $PF = \cos \phi$.
- Resistência de isolamento: esta é uma medida da quantidade de corrente contínua que flui através do dielétrico de um capacitor com uma tensão aplicada. Nenhum material é um isolador perfeito.

Este caminho atual é representado por R_p no circuito equivalente e, tipicamente, possui um valor de 100 GΩ ou mais.

- Resistência de série efetiva (ESR): é o equivalente combinado de R_s e R_p para uma corrente alternada em uma dada frequência. É dada pela fórmula abaixo onde $\omega = 2\pi f$.

$$ESR = \frac{PF}{\omega C} (1 \times 10^6)$$

- Fator de dissipação (DF): é a razão da resistência CA (ou ESR) com a reatância ideal de um capacitor. É dada pela fórmula:

$$DF = \frac{ESR}{X_c} \times 100\%$$

- Fator de qualidade (Q): é definido como o fator de qualidade de um capacitor e é o recíproco de DF. Quanto maior for o Q, melhor é o capacitor.

$$Q = \frac{1}{DF}$$

O efeito dessas imperfeições no capacitor pode ser visto no gráfico da figura da sequência.

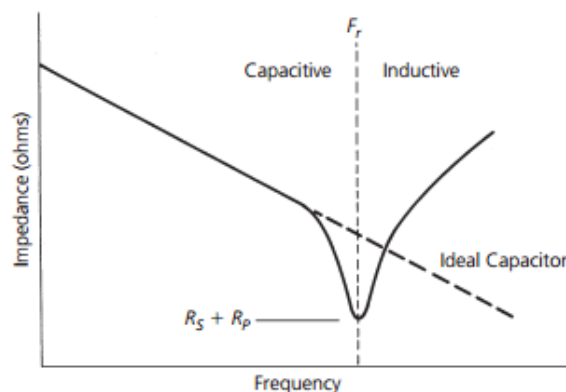


Figura 6 – Características de impedância de um capacitor em função da frequência.

A análise do gráfico anterior mostra que até a frequência F_r de ressonância do componente, provocada pelos elementos parasitas, o capacitor tem um comportamento de impedância típico de um capacitor. Contudo, após este ponto, a curva de impedância do capacitor começa a se comportar como a de um indutor não valendo mais a formulação clássica. Naturalmente que alguns tipos de capacitores estão mais sujeitos a este tipo de comportamento indesejado e outros menos. Os próximos tópicos tentam caracterizar os principais tipos de capacitores disponíveis no mercado. Eles geralmente são classificados segundo o emprego dos materiais dielétricos que usam (papel, plástico, cerâmica, mica, poliestireno, policarbonato, teflon, óleo, vidro, ar, etc). Cada material tem suas vantagens e desvantagens. São estes os principais:

- Cerâmicos: variam amplamente tanto na constante dielétrica ($k = 5$ a 10.000) quanto nas características da temperatura. Os capacitores de (dielétrico de) cerâmica geralmente tem: (i) baixa qualidade, (ii) tamanho reduzido (porque tem alto k); (iii) são moderadamente estáveis (variam $\pm 15\%$ de sua capacitância nominal em relação à sua faixa de temperatura); e (iv) não são polarizados. São aplicados em circuito de aplicação geral que não exigem tanta precisão. Em RF, geralmente são usados apenas

em bypass e aplicações do tipo. Existe um modelo de capacitor cerâmico chamado de NPO cuja variação de C em função da temperatura é baixa e por isto tem sido amplamente utilizado.

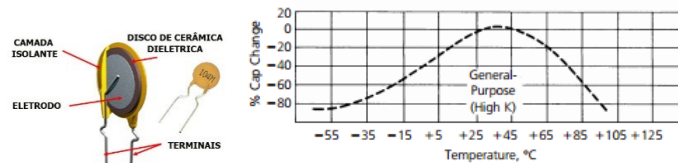


Figura 7 – Esquerda: capacitores cerâmicos. Direita: curva de variação em função da temperatura

- Mica: baixo k (cerca de 5) e por isto são geralmente grandes. Seu baixo k , no entanto, produz uma característica de temperatura extremamente boa. Assim, os capacitores de mica são usados extensivamente em circuitos ressonantes e em filtros onde o tamanho não é importante, mas a estabilidade de variação de C em função da temperatura é. Mesmo assim tem sido substituídos por capacitores cerâmicos NPO que são mais baratos, menores e com características similares. Não são polarizados.
- Filme metalizados (eletrolíticos): é uma ampla categoria de capacitores que engloba a maioria dos outros capacitores listados. São usados em várias aplicações, incluindo filtragem, bypass e acoplamento. A maioria dos capacitores nesta categoria são geralmente maiores do que os tipos cerâmicos de valor equivalente e são usados em aplicativos onde o espaço não é uma restrição. Geralmente tem polarização e sua estabilidade em temperatura é limitada.

2.4 - Indutores

Um indutor não é mais do que um fio enrolado ou enrolado de modo a aumentar a ligação do fluxo magnético entre as voltas da bobina. Esta ligação de fluxo aumentada incrementa a auto-indutância do fio. Eles são utilizados amplamente no projeto de RF em circuitos ressonantes, filtros, redes de deslocamento, casamento de impedância dentre outras aplicações. Como descobrimos nas seções anteriores deste capítulo, não há um componente "perfeito", e os indutores certamente não são uma exceção. Na verdade, dos componentes que discutimos, o indutor é provavelmente o componente mais propenso a mudanças muito drásticas em relação à frequência. A na sequência mostra o que um indutor realmente parece em frequências de RF. A proporção da reatância X_L de um indutor com a resistência R_s do modelo é frequentemente usada como medida da qualidade do indutor Q conforme relação matemática abaixo. O valor de Q varia segundo a frequência de trabalho.

$$Q = \frac{X_L}{R_s}$$

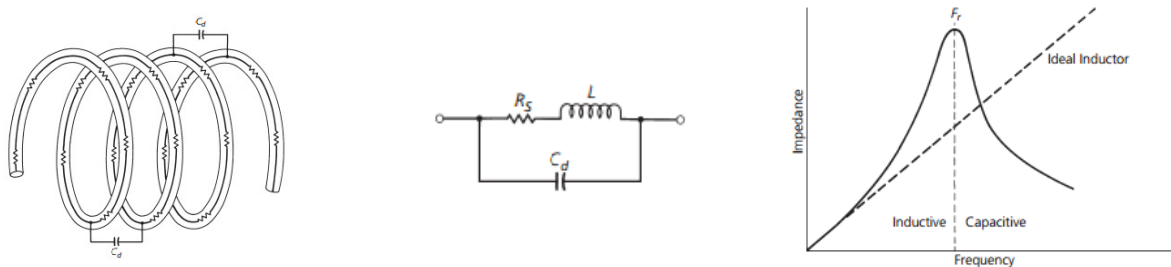


Figura 8 – Esquerda: ilustração de um indutor. Centro: modelo do indutor para RF com componentes parasitas. Direita: impedância real do indutor em função da frequência.

Na figura anterior existe alguma resistência de fio que gera uma queda de tensão (mesmo que muito pequena) entre os enrolamentos, produzindo pequenos efeitos de capacitância. Em consequência disto, a curva de impedância do indutor também muda com a frequência conforme visto na figura anterior devido ao fenômeno de ressonância ocasionado pela capacitância parasita e pela indutância do indutor conforme modelo da figura anterior. Após a frequência de ressonância, nota-se que o comportamento capacitivo é predominante sobre o indutor. Contudo vale destacar que existem modelos modernos de indutores, como os conhecidos como “chip” onde este efeito indesejado é praticamente desprezível para ampla faixa de frequência. A figura da sequência mostra a variação da indutância (neste caso o fabricante preferiu mostrar a variação da indutância) em função da frequência para indutores chip.

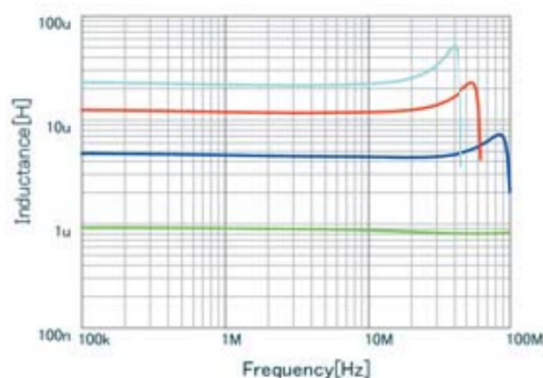


Figura 9 – Curva características de um indutor chip da fabricante Murata⁵. Família LQH2MCN.

Há métodos para aumentar tanto o Q de um indutor quanto a ampliação da sua faixa de frequência. Eles geralmente estão relacionados com o aumento da permeabilidade do fluxo magnético. Isso é geralmente feito enrolando-se o indutor em torno de um material de núcleo magnético (como ferro ou ferrite). Um indutor ou bobina feita desta maneira também necessitará de menos voltas para uma determinada indutância. A figura na sequência mostra um indutor do tipo toroide com núcleo ferromagnético. Em circuito de comunicação é altamente desejável que o indutor tenha uma blindagem para evitar que o campo magnético do indutor possa induzir sinais elétricos que propagam em fios ou trilhas próximas ao indutor e assim assegurar a compatibilidade eletromagnética (EMC) da aplicação.

⁵ Catálogo disponível em: <https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/inductor/chip/o05e.ashx>



Figura 10 – Esquerda: indutor toroidal enrolado em torno de um material ferromagnético. Empregado em aplicações de maior potência/corrente. Direita: indutor com núcleo ferromagnético blindado e em encapsulamento SMD. Usado para pequenos sinais.

2.5 – Transistor em RF

Vimos que quando trabalhamos em frequências mais altas, nós já não podemos pensar em um capacitor como apenas um capacitor, ou um indutor como um indutor. Na verdade, cada um desses componentes pode ser representado por um equivalente de circuito que indica quão imperfeito esse componente realmente é e quais serão os efeitos destas imperfeições na frequência de operação de nosso circuito.

De igual forma, o transistor também é um dispositivo imperfeito cujas características também variam com a frequência. Portanto, o circuito equivalente para um transistor típico é introduzido e analisado. Então, com a ajuda do circuito equivalente, a entrada, saída e características de ganho são descritos. Em seguida, em capítulo posterior introduziremos os ditos “parâmetros Y e S” que são usados pelos fabricantes para caracterizar os transistores e circuitos de um modo em geral.

O circuito da figura da sequência mostra o circuito equivalente do transistor em RF. Ele é o circuito equivalente ao conhecido como o modelo π de um emissor comum. À primeira vista, o híbrido π parece ser bastante formidável para fins de análise.

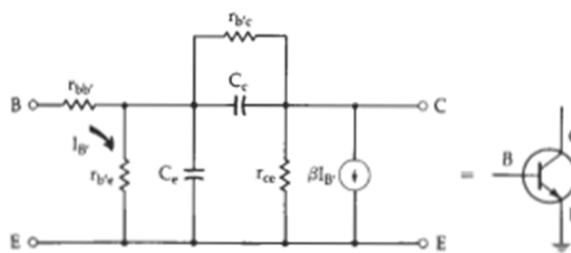


Figura 11 – Circuito equivalente da configuração emissor-comum para RF. A maior parte destes elementos retrata elementos parasítas inerentes internos ao material semicondutor em si.

Como não usaremos estes modelo para o transistor de forma prática, não nos daremos ao trabalho de definir seus componentes detalhadamente. Mesmo assim, o texto da sequência faz uma breve explanação destes parâmetros do modelo.

- $r_{bb'}$: resistência que ocorre na junção entre o terminal da base/contato e o material semicondutor (valores típicos na ordem de dezenas de ohms).
- $r_{b'e}$: resistência na junção base-emissor (valores típicos na ordem de 1000Ω).

- $r_{b'c}$: resistência de feedback (valores típicos na ordem de $5M\Omega$) que aparece da base para o coletor do transistor.
- r_{ce} : resistência de saída vista olhando de volta para o coletor do transistor (superior a $100k\ \Omega$)
- C_e : capacitância de difusão (e junção) do emissor associada à física da própria junção de semiconductor (valores típicos na ordem de 100 pF).
- C_c : capacitância de feedback formada na junção base/coletor quando esta junção é polarizada reversamente. A medida que a frequência de operação para o transistor aumenta, C_c , pode começar a ter um efeito nitido na operação do transistor (valores típicos na ordem de 3 pF).

Neste momento o leitor já deve ter percebido que o circuito equivalente para um transistor típico não é trivial para RF. E existem modelos mais complexos que contempla mais elementos parasitas que afetam a operação do dispositivo em alta frequência.

Para avaliar a impedância de entrada de um transistor, por exemplo, podemos fazer uma série de algebrismos e aplicação de leis de circuitos elétricos para estimar a impedância de entrada Z_{in} como:

$$Z_{in} = j\omega L_T + r_{bb'} + \frac{r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e} C_T}$$

A equação anterior é plotada na carta de Smith⁶ considerando alguns valores comerciais para $r_{bb'}$, L_T , $r_{b'e}$ e C_T . Esta carta é mostrada na sequência.

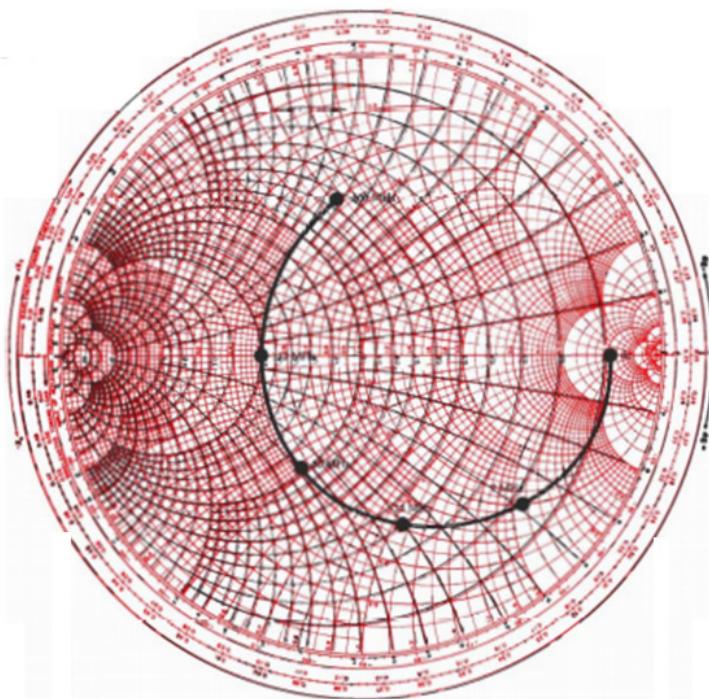


Figura 12 – Impedância de entrada de um transistor (ou seu modelo) versus frequência. Estimativa feita para seis pontos de frequência. Gráfico normalizado por conveniência.

⁶ Caso você não conheça a carta de Smith, ela será abordada mais à frente no capítulo de casamento de impedância. Mesmo assim, procure entender seu funcionamento por é um recurso muito usual na área de eletrônica de RF e comunicação.

A maioria dos fabricantes usará em seus datasheets parâmetros de admitância em vez de parâmetros de impedância para descrever as características do transistor. Isso às vezes pode ser confuso para o projetista que não está acostumado a trabalhar com admitância. Mas esta é uma questão de costume.

Os componentes de feedback do transistor equivalente são $r_{b'e}$ e C_c . De ambos, C_c é o mais importante pois é o elemento cujo valor muda com a frequência. A quantidade $r_{b'e}$, por outro lado, é muito grande e constante e contribui pouco com as características de feedback do dispositivo. À medida que a frequência de operação do transistor aumenta, C_c torna-se cada vez mais importante para o projetista porque a reatância é decrementada. Assim, uma porção cada vez maior do sinal do coletor é alimentada de volta à base. Em baixas frequências, o feedback geralmente não é um problema porque C_c inibe a realimentação para causar instabilidade. Em altas frequências, no entanto, reatâncias parasitas acopladas a C_c poderiam agir para produzir uma mudança de fase de 180° no sinal realimentado do coletor para base. Esta mudança de fase de 180° , quando adicionada a mudança de fase de 180° que é normalmente produzida na configuração emissor comum durante a amplificação, poderia transformar um amplificador em um oscilador. Quando vemos a teoria de osciladores você entenderá isto melhor. Neste caso, este efeito é altamente indesejado pois a oscilação cria uma frequência indesejada na operação do transistor.

Outro problema associado ao feedback interno do transistor é o fato que o coletor do circuito elétrico não está realmente isolado da base. Assim, qualquer alteração na resistência de carga (R_L) do coletor afeta diretamente a impedância de entrada do transistor. Da mesma forma, qualquer alteração na resistência de fonte (R_S) no circuito ligado à base afeta diretamente a impedância de saída do transistor.

Sob o ponto de vista do ganho, em RF normalmente nos interessamos por ganho de potência e nem tanto pelo ganho de tensão ou corrente isoladamente. É ganho de potência é importante por causa da infinidade de impedância que abundam em circuitos RF. Quando uma destas impedâncias mudam em um circuito, os ganhos de tensão e correntes deixam de significar tanto pois seu controle é mais difícil. O ganho de potência de um transistor normalmente se assemelha uma curva semelhante à mostrada na figura da sequência. Notar que o ganho que deve cair a uma determinada taxa. A frequência máxima no qual o transistor fornece um ganho de potência de 0dB (ou ganho de 1x) é rotulado como f_{max} no diagrama.

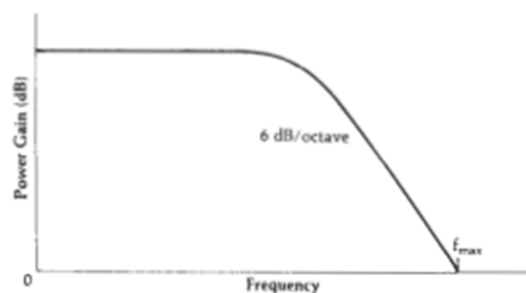


Figura 13 – Ganho de potência típico de um transistor versus curva de frequência.

Lembrando que $r_{b'e}$ e C_c proveem um caminho para feedback/realimentação interna ao transistor. Em virtude disto podem diminuir o ganho do dispositivo. Eliminar o feedback (negativo) aumenta o ganho do transistor. Este processo de eliminar o feedback é chamado de **neutralização**. O ganho de potência neutralizado é aquele ganho que ocorre quando a capacitância de feedback é neutralizada. Ganho não

neutralizado, por outro lado, ocorre quando nenhum componente de feedback é compensado. Das duas opções, o amplificador operando com neutralização produz o maior ganho e o não-neutralizado produz o mínimo.

Finalmente, é importante dizer que outra forma de tratar o transistor é considera-lo apenas como uma caixa preta de duas portas. Ou melhor dizendo (em termos técnicos), como uma “**rede de duas portas**”. Dadas as dificuldades de determinação de tantos parâmetros, os projetistas atualmente têm preferido tratar o transistor como uma caixa preta qualquer de duas portas e modelar esta caixa preta usando alguma técnica (por parâmetros S ou Y) como será visto em capítulo posterior. O transistor é um dispositivo de três terminais. No entanto, na maioria das aplicações, um dos terminais é comum tanto para a rede de entrada como para a saída. Na configuração de emissor-comum, por exemplo, o emissor é aterrado e por isto é comum tanto para a entrada como para a saída rede. Então é conveniente descrever o dispositivo como uma caixa de caixa preta (ou rede de duas portas). Uma porta é descrita como a porta de entrada e a outra como porta de saída. Uma vez que a realização de duas portas é feita, o transistor pode ser completamente caracterizado pela observação de seu comportamento nas duas portas como será visto mais a frente.
