

Capítulo 1:

Componentes discretos e modelos equivalentes para RF

Prof. Alan Petrônio Pinheiro

Universidade Federal de Uberlândia

Faculdade de Engenharia Elétrica

alanpetronio@ufu.br



Radiofrequências

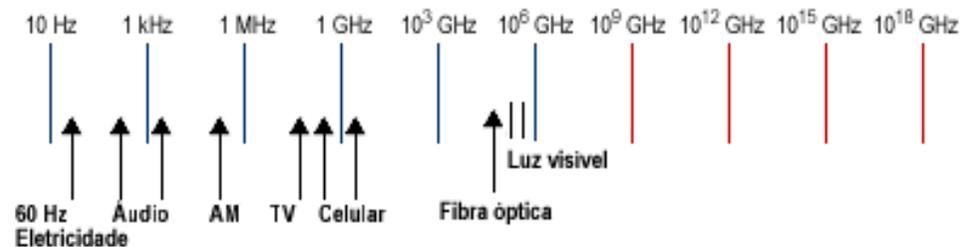
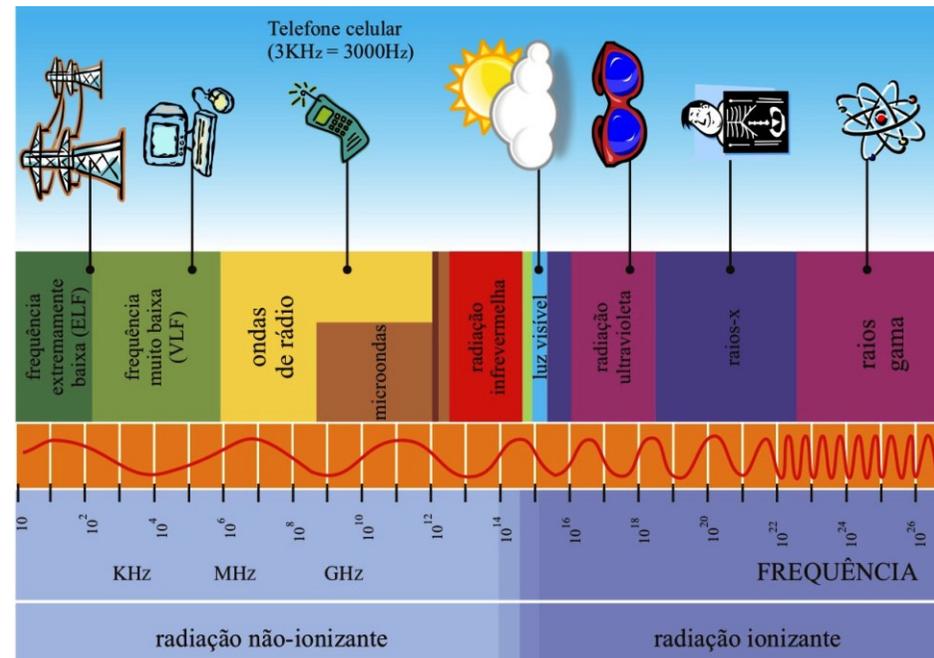
Cir. Eletrônica Aplica.

- espectro eletromagnético de 9 kHz a 300 GHz utilizada na radiocomunicação

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?



IR: Infra-vermelho UV: Ultra-violeta



Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- **Espectro**
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

Nome	Faixas de frequência
DC	0 Hz
Frequências de potência	10–1.000 Hz
Áudio	20–20.000 Hz
Vídeo	50 Hz–4,5 MHz
Supersônica ou ultra-sônica	25 kHz–2 MHz
Frequências de rádio muito baixas (VLF)	10–30 kHz
Frequências de rádio baixas (LF)	30–300 kHz
Frequências de rádio médias (MF)	300 kHz–3 MHz
Frequências de rádio altas (HF)	3–30 MHz
Frequências de rádio muito altas (VHF)	30–300 MHz
Frequências de rádio ultra-altas (UHF)	300 MHz–3 GHz
Frequências de rádio superaltas (SHF)	3–30 GHz
Frequências de rádio extremamente altas (EHF)	30–300 GHz banda milimétrica
Calor ou infravermelho	1×10^{12} – $4,3 \times 10^{14}$ Hz [†]
Luz visível — vermelha ao violeta	$4,3 \times 10^{14}$ – 1×10^{15} Hz
Ultravioleta	1×10^{15} – 6×10^{16} Hz
Raios X	6×10^{16} – 3×10^{19} Hz
Raios gama	3×10^{19} – 5×10^{20} Hz
Raios cósmicos	5×10^{20} – 8×10^{21} Hz



Efeito pelicular

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

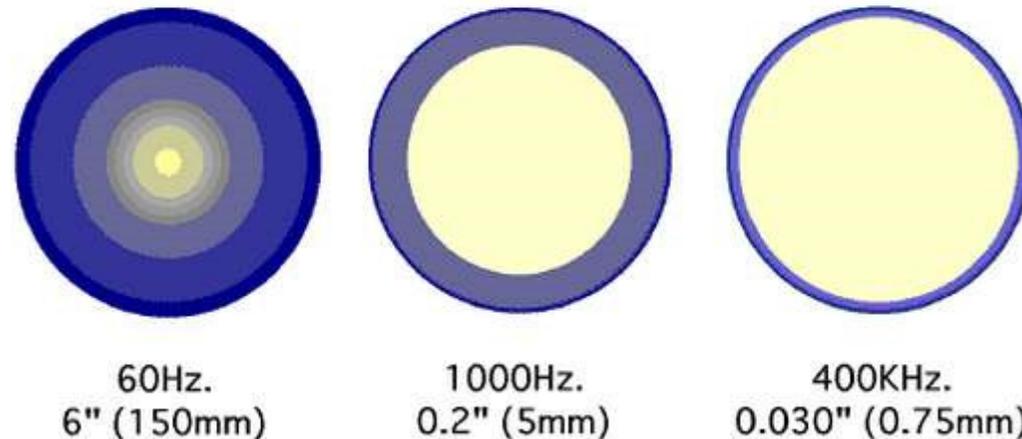
Componentes e
modelos para RF

- Espectro
- **Efeito pelicular**
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

- “Fenômeno responsável pelo aumento da resistência aparente de um condutor elétrico em função do aumento da frequência da corrente elétrica que o percorre”

H.F. SKIN EFFECT

CURRENT PENETRATION DEPTH IN STEEL (CURRENT SHOWN IN BLUE)





- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Auto indutância:

- Corrente alternada -> campo magnético -> expande/contrai -> tensão induzida -> oposição alterações corrente

- Cálculo:

$$L = 0,002l \left(2,3 \log \left(\frac{4l}{d} - 0,75 \right) \right) [\mu H]$$

L – Indutância em μH

l – Comprimento do fio em cm

d – Diâmetro do fio em cm

- Exemplo: 5cm de fio nº22 de cobre

$$L = 0,002(5) \left(2,3 \log \left(\frac{4 \times 5}{0,0644} - 0,75 \right) \right) [\mu H] = 57 nH$$

- Conclusão: todos condutores em RF exibem comportamento de indutores



Capítulo 1:

Componentes e
modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Tabela AWG para bitola de fios

Wire Size (AWG)	Dia in Mils* (Bare)	Dia in Mils (Coated)	Ohms/ 1000 ft.	Area Circular Mils	Wire Size (AWG)	Dia in Mils* (Bare)	Dia in Mils (Coated)	Ohms/ 1000 ft.	Area Circular Mils
1	289.3		0.124	83690	26	15.9	17.2	41.0	253
2	257.6		0.156	66360	27	14.2	15.4	51.4	202
3	229.4		0.197	52620	28	12.6	13.8	65.3	159
4	204.3		0.249	41740	29	11.3	12.3	81.2	123
5	181.9		0.313	33090	30	10.0	11.0	104.0	100
6	162.0		0.395	26240	31	8.9	9.9	131	79.2
7	144.3		0.498	20820	32	8.0	8.8	162	64.0
8	128.5	131.6	0.628	16510	33	7.1	7.9	206	50.4
9	114.4	116.3	0.793	13090	34	6.3	7.0	261	39.7
10	101.9	104.2	0.999	10380	35	5.6	6.3	331	31.4
11	90.7	93.5	1.26	8230	36	5.0	5.7	415	25.0
12	80.8	83.3	1.59	6530	37	4.5	5.1	512	20.2
13	72.0	74.1	2.00	5180	38	4.0	4.5	648	16.0
14	64.1	66.7	2.52	4110	39	3.5	4.0	847	12.2
15	57.1	59.5	3.18	3260	40	3.1	3.5	1080	9.61
16	50.8	52.9	4.02	2580	41	2.8	3.1	1320	7.84
17	45.3	47.2	5.05	2050	42	2.5	2.8	1660	6.25
18	40.3	42.4	6.39	1620	43	2.2	2.5	2140	4.84
19	35.9	37.9	8.05	1290	44	2.0	2.3	2590	4.00
20	32.0	34.0	10.1	1020	45	1.76	1.9	3350	3.10
21	28.5	30.2	12.8	812	46	1.57	1.7	4210	2.46
22	25.3	27.0	16.2	640	47	1.40	1.6	5290	1.96
23	22.6	24.2	20.3	511	48	1.24	1.4	6750	1.54
24	20.1	21.6	25.7	404	49	1.11	1.3	8420	1.23
25	17.9	19.3	32.4	320	50	.99	1.1	10600	0.98

* 1 mil = 2.54×10^{-3} cm



Resistores

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

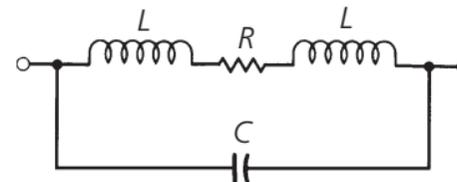
- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- **Resistores**
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Resistores

- Propriedade material que determina a taxa na qual energia elétrica é convertida em térmica por uma dada corrente.



- Modelo para RF:



C = capacitâncias parasitas

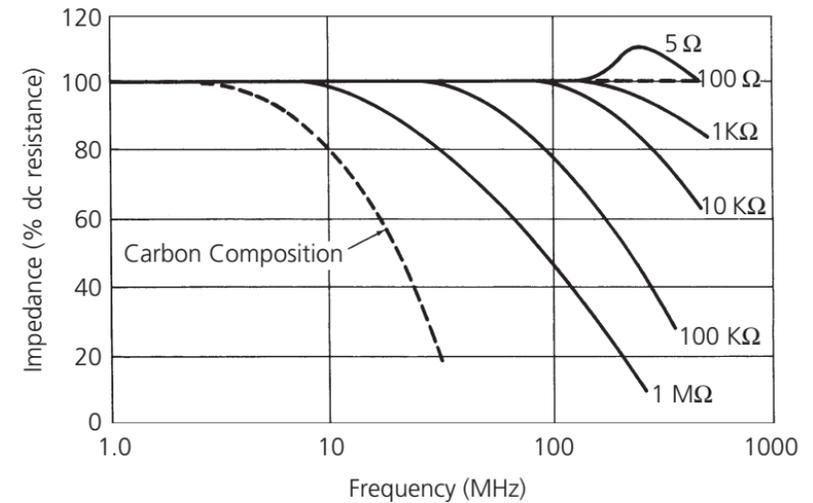
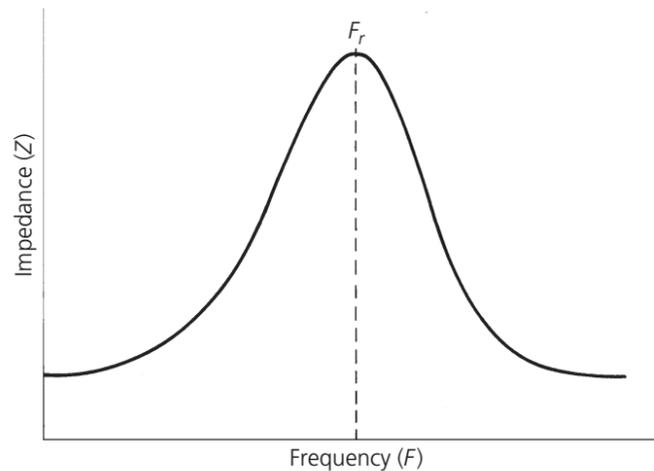


Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

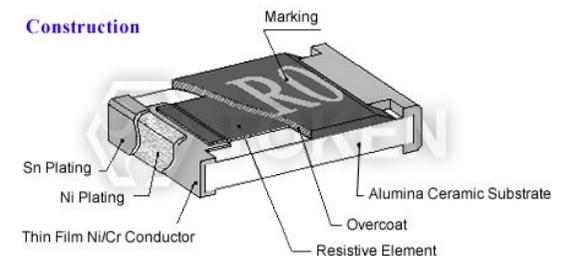
- C e L ressonam produzindo pico de impedância:



- Exemplo: calcule a resistência de um resistor 10k ohm quando ele opera em 200MH. Considere que ele é feito de 1,27cm de fio nº14 e tem capacitância parasita de 0.3pF.

– Resposta: 2,4k ohm

- Resistor de filme fino (“thin-film”)
 - baixa reatância até 3GHz)





Capacitores

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e
modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- **Capacitores**
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

- **Uso em RF:**

- Bypass, acoplamento, ressonância e filtros

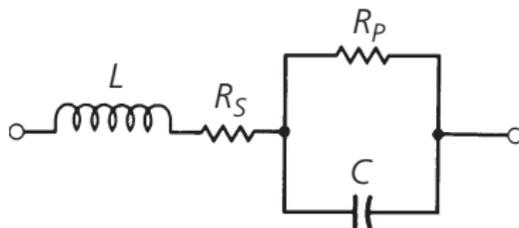
- **Equação e armazenamento de energia:**

$$C = \frac{Q}{V} \approx \frac{0.2249\epsilon A}{d\epsilon_0}$$

- ϵ = permissividade

- $\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = k$ = constante dielétrica (comparação com o ar como dielétrico)

- **Circuito equivalente em RF:**



- R_S = perda dissipação expressão como o fator de potência (FP)
- R_P = resistência de isolação (100 Gohms)



Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Resistência CA do capacitor:

○ $FP = \cos\phi$

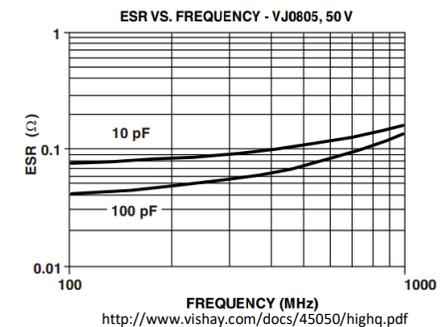
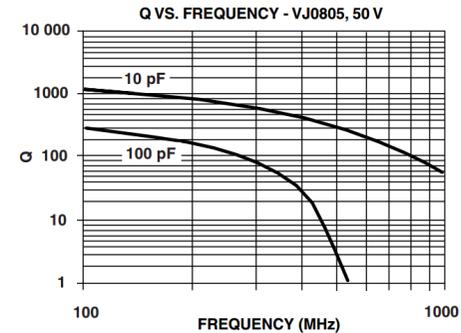
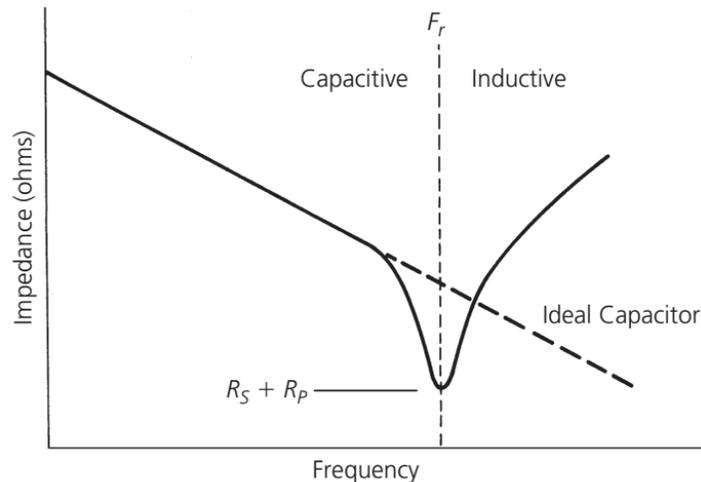
○ Resis. Efetiva série = $ESR = \frac{FP \cdot 10^6}{\omega C}$

○ Fator dissipador = $FD = \frac{ESR}{X_C} \cdot 100\%$

○ Fator qualidade = $Q = \frac{1}{FD} = \frac{X_C}{ESR}$

Onde: ϕ diferença fase entre I e V

• Comportamento:



<http://www.vishay.com/docs/45050/highq.pdf>

- F_r = indutância fica em ressonância séria com capacitor
- Acima F_r capacitor age como indutor
- Análise por "Network analyzer"

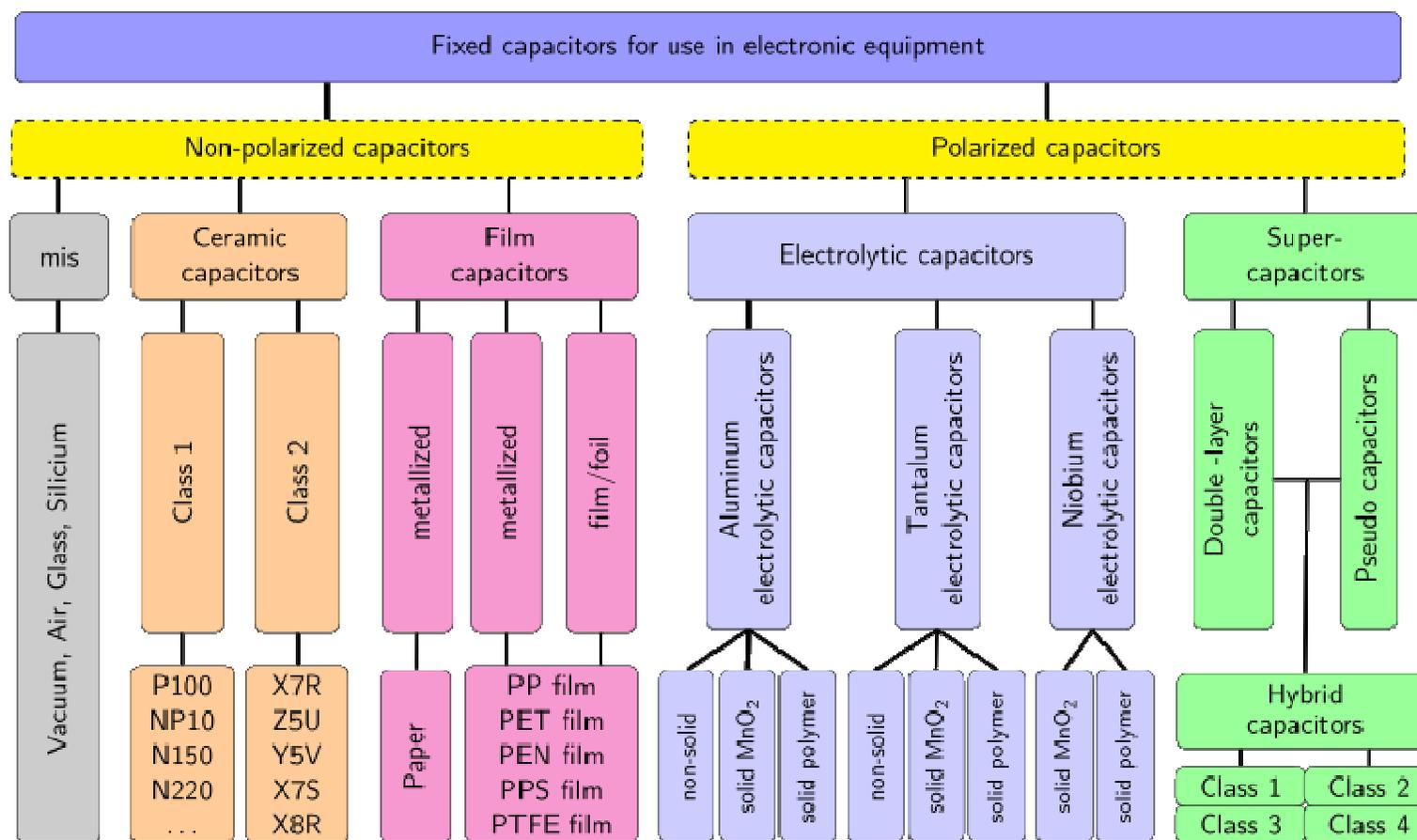




- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Tipos capacitores:

– Classificação segundo tipo dielétrico e polaridade





Cir. Eletrônica Aplica.

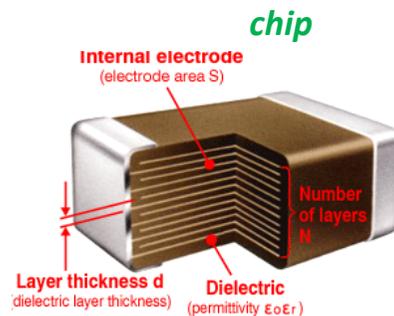
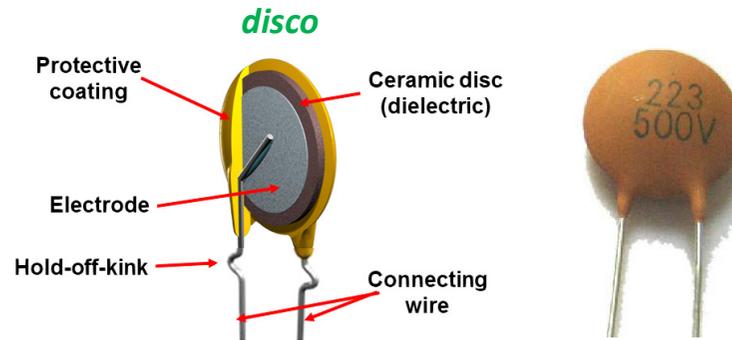
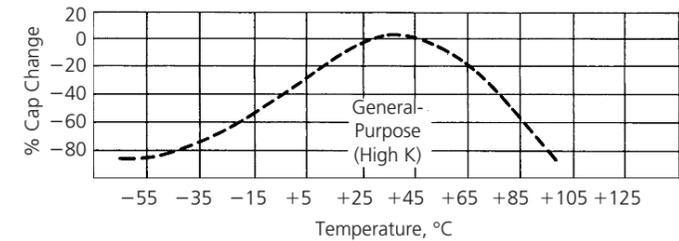
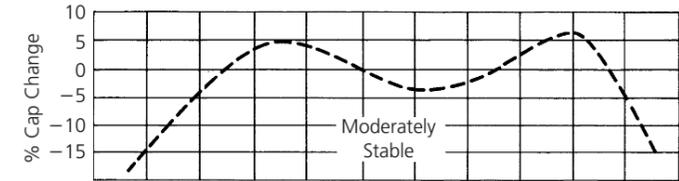
Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

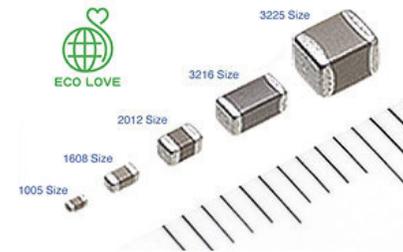
Capacitores Cerâmicos:

- Constante dielétrica (K) entre 5 e 10000
- Quanto maior o K, pior na sensibilidade à temperatura
- Precaução no uso em circuitos ressonantes e filtros
- Uso típico em circuitos chaveados e bypass
- Modelos desenvolvidos especialmente para RF (alto Q)
 - Capacitores compensadores de temperatura (ou NPO ceramics – negative positive zero)
 - Chip capacitors

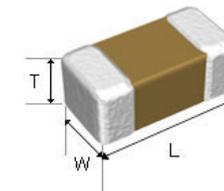


$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} N$$

- C : Capacitance
- ϵ_0 : Permittivity in a vacuum
- ϵ_r : Relative permittivity of dielectric
- S : Electrode area
- d : Dielectric layer dimensions
- N : Number of layers



External view and dimensions



Form Factor	Dimensions (mm)		
	L	W	T
C1005	1.00±0.05	0.50±0.05	0.50±0.05
C1608	1.60±0.10	0.80±0.10	0.80±0.10
C2012	2.00±0.20	1.25±0.20	1.25±0.20
C3216	3.20±0.20	1.60±0.20	1.60±0.20
C3225	3.20±0.30	2.50±0.30	2.50±0.30



Cir. Eletrônica Aplica.

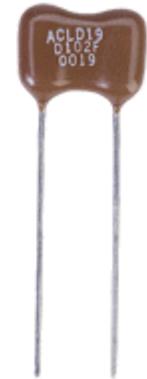
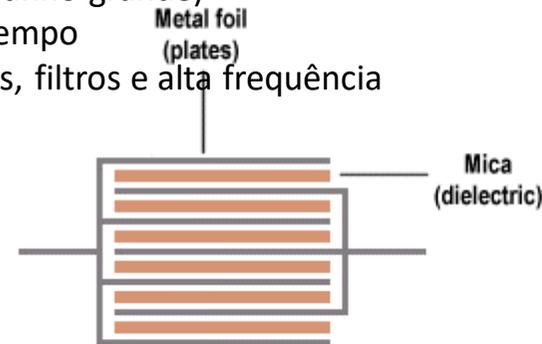
Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

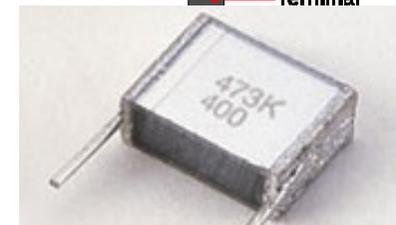
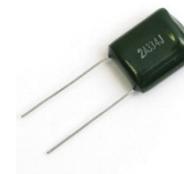
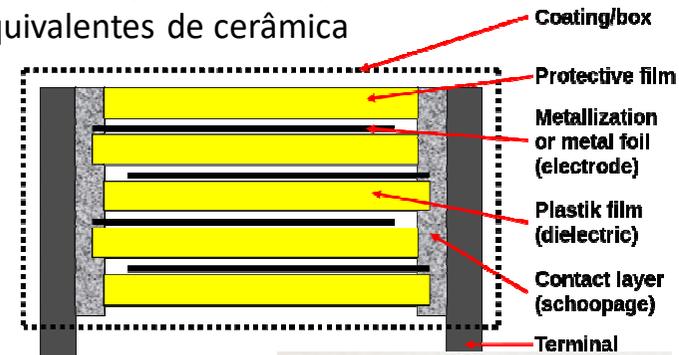
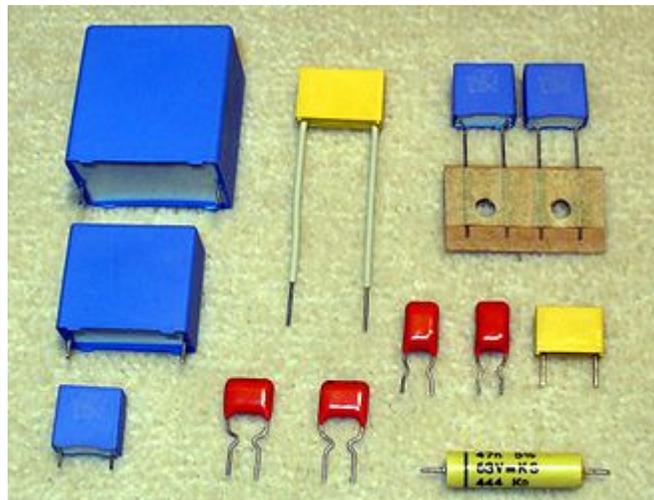
Capacitores de mica:

- Constante dielétrica (K) em torno de 6 (tamanho grande)
- Estabilidade em função da temperatura e tempo
- Usado em circuitos de precisão, ressonantes, filtros e alta frequência
- Mais precisos; baixas perdas (alto Q)
- Mais caro que cerâmicos



Capacitores filme metalizado:

- Engloba muitos (teflon, poliéster, policarbonato, papel, etc)
- Usado em filtragem, bypass e acoplamento
- Os de teflon, poliestireno e policarbonato apresentam capacitância precisa com variação $\pm 2\%$ em toda a faixa de temperatura de operação (evitar após 85°C , especialmente poliéster)
- Geralmente de tamanho maior que os equivalentes de cerâmica





Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

Tantalum:

- polarizado
- barato
- Não altera capacitância com tensão

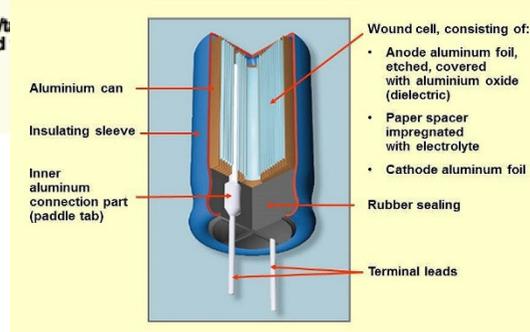
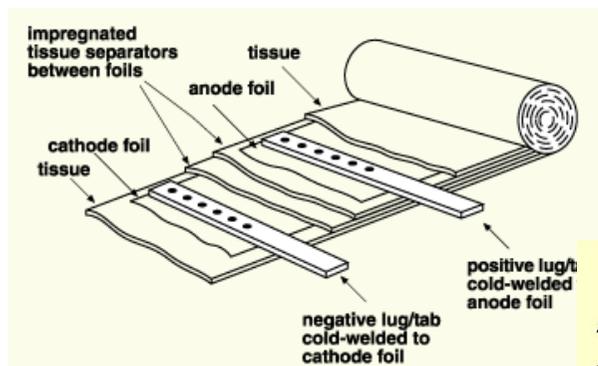


Tantalum



Eletrolítico:

- Termo genérico para capacitores de tantalum, alumínio e nióbio
- polarizados
- Altas capacitâncias
- Filtragem, by-pass, sinais DC, etc





Indutores

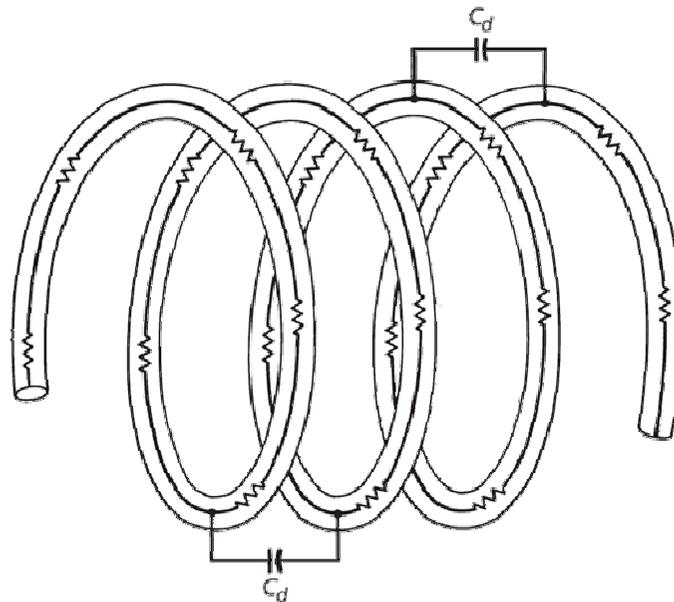
Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e
modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- **Indutores**
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

- Fluxo magnético entre bobinas
 - Aumento da auto-indutância
- Grandes alterações em frequência



Capacitâncias distribuídas





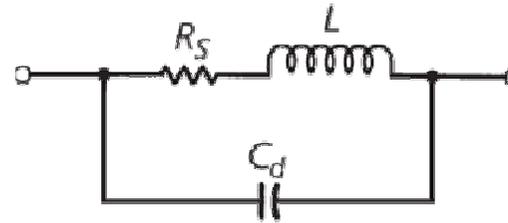
Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e
modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

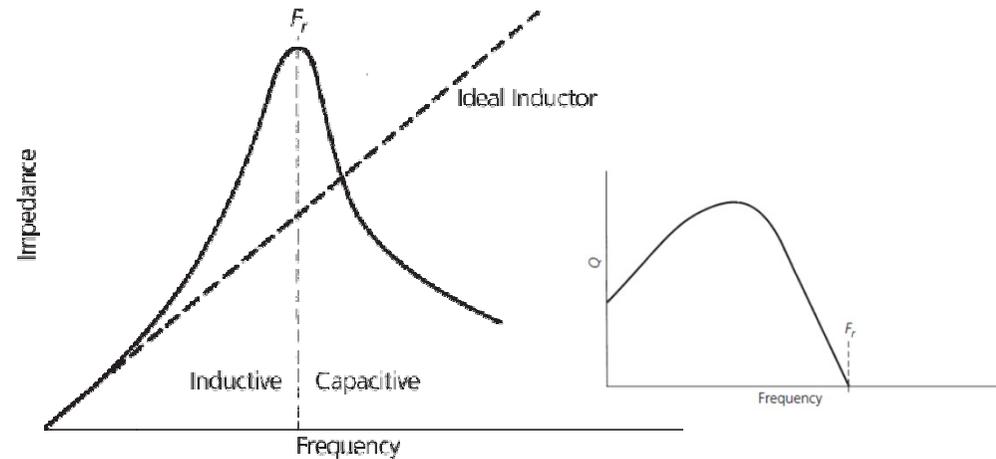
• Modelo indutor para RF:



• Comportamento em frequência

$$X_c = j\omega L = 2\pi fL$$

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



$$Q = \frac{\text{Energy stored}}{\text{Energy lost}} = \frac{\text{Reactive Power}}{\text{Resistive Power}} = \frac{I_L^2 X_L}{I_L^2 R} \quad \text{or} \quad Q = \frac{X_L}{R}$$



- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

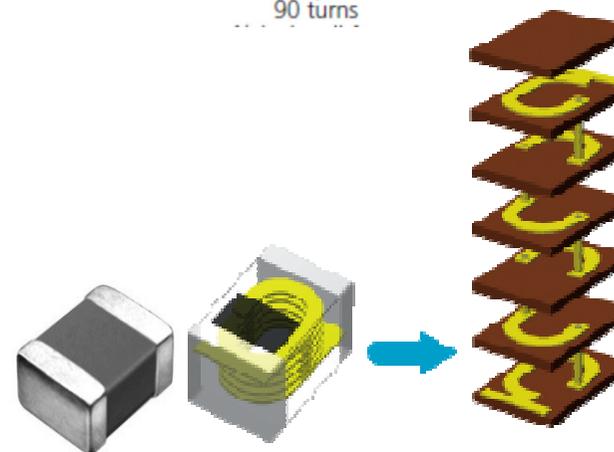
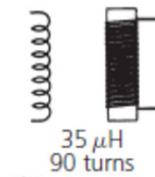
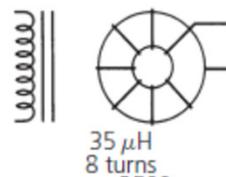
• Indutor sem núcleo

$$L = \frac{0.394r^2 N^2}{9r + 10l}$$

- Onde: r =raio bobina em cm; l =comprimento bobina em cm e L =indutância (microHenries)

• Necessidade de melhorar permeabilidade do fluxo magnético

- Núcleo magnético



The structure of a multilayer chip inductor



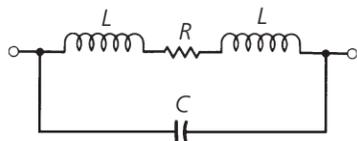
Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

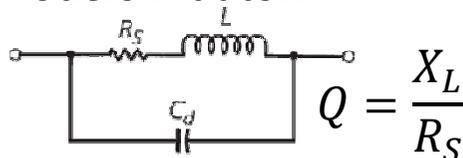
Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- **Resumo**
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

Modelo resistor:



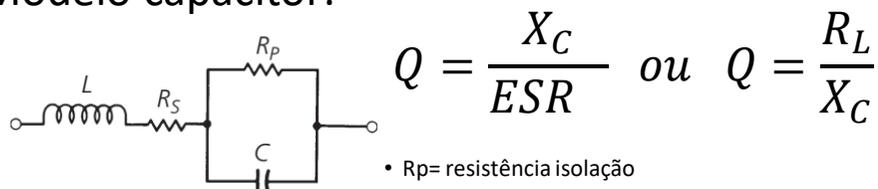
Modelo indutor:



- Cd=capacitância parasita
- Rs= resistência enrolamentos

$$X_L = 2\pi fL$$

Modelo capacitor:



- Rp= resistência isolação
- Rs= perda dissipação
- RL= resistência de carga
- ESR=resistência em série efetiva (combina Rs, Rp e resistência AC do cap.)

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$



Transistor em RF

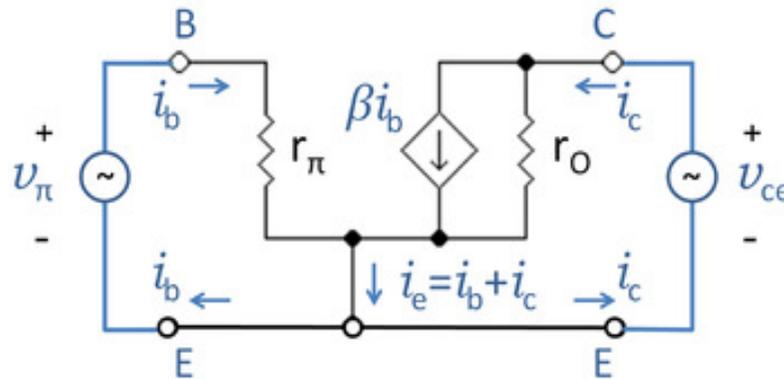
Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

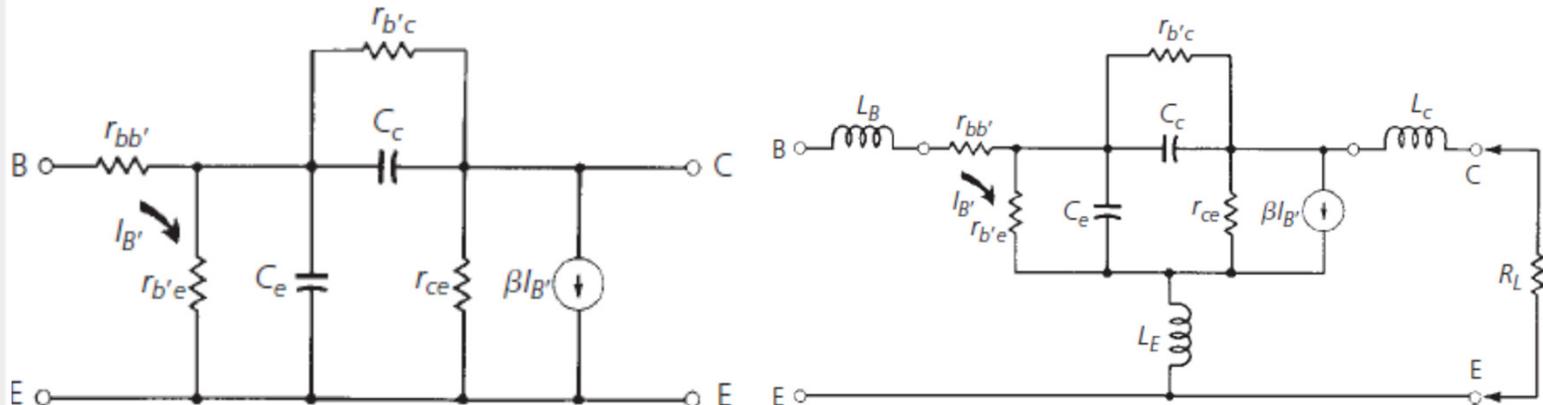
Componentes e
modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- **Transistor**
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Transistor modelo pi:



• Transistor RF – efeitos de frequência

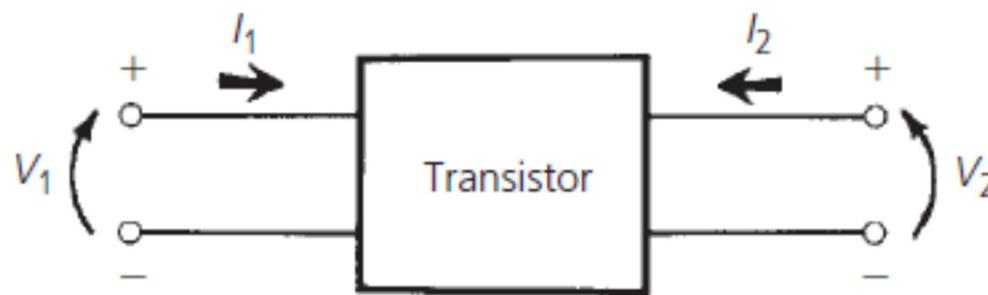




- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- **Transistor**
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Modelagem do transistor em RF:

– Parâmetros Y:



$$I_1 = y_i V_1 + y_r V_2$$

$$I_2 = y_f V_1 + y_o V_2$$

$$y_i = \frac{I_1}{V_1} \Big|_{V_2 = 0}$$

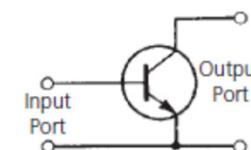
$$y_r = \frac{I_1}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

$$y_f = \frac{I_2}{V_1} \Big|_{V_2 = 0}$$

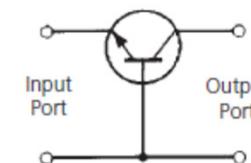
$$y_o = \frac{I_2}{V_2} \Big|_{V_1 = 0}$$

Cálculo de y_i :

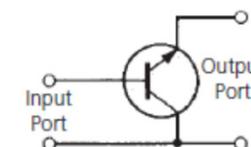
- 1) Inserir um capacitor de curto grande para Aquele terminal
- 2) Inserir um sinal V_1 conhecido
- 3) Medir I_1



(A) Common emitter



(B) Common base



(C) Common collector



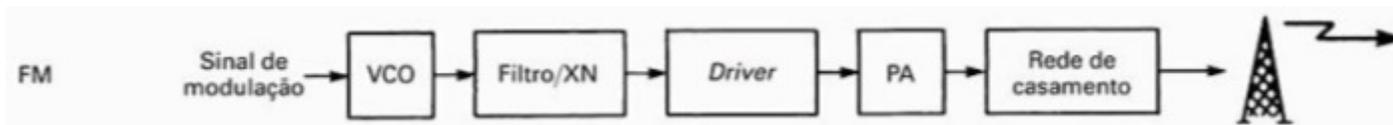
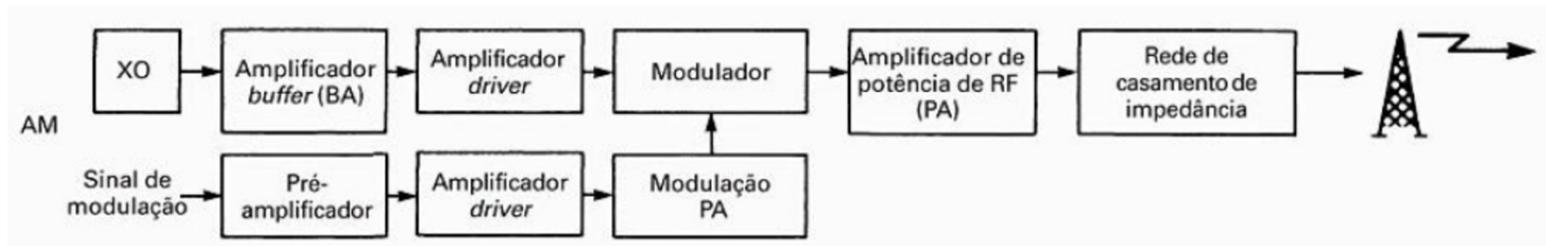
Visão geral sobre elementos compõem circuitos de transmissão e recepção de dados

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- **Visão geral**
- O que veremos depois?



O que veremos no próximo capítulo?

Cir. Eletrônica Aplica.

Capítulo 1:

Componentes e modelos para RF

- Espectro
- Efeito pelicular
- Fios
- Resistores
- Capacitores
 - Tipos Capacitores
- Indutores
 - Núcleos
 - Toróide
- Resumo
- Transistor
- Visão geral
- O que veremos depois?

• Circuitos ressonantes LC

• Filtros passivos

- Circuitos de filtros passivos para RF
- Circuito LC ressonante para sintonização e fator Q
- Filtros Butterworth, Bessel e Chebyshev e similares
- Conversão de filtros para passa-alta, passa-banda e rejeita banda
- Práticas com simulação e montagem

