

Apresentação

SEL 369 Micro-ondas

Amílcar Careli César

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da EESC-USP

Atenção!



- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de [SEL-369 Micro-ondas](#), oferecida aos alunos regularmente matriculados nos cursos de engenharia elétrica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ Solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

Ementa

- ✓ **Teoria eletromagnética**, linhas de transmissão e guias de onda: Equações de Maxwell, onda plana, reflexão e transmissão de ondas; modos de propagação, propagação de ondas na atmosfera; guia metálico e dielétrico; microfita finline, slotline; materiais para substratos
- ✓ **Análise de redes**: matrizes impedância, admitância, ABCD, espalhamento; gráfico de fluxo de sinais
- ✓ **Circuitos passivos**: adaptadores de impedância; acoplador direcional, híbrido, Lange, Wilkinson
- ✓ **Síntese de redes passivas e filtros**: Frequência complexa; estruturas periódicas, características de respostas em frequência; projetos de filtros passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa
- ✓ **Amplificadores**: características de transistores; ganhos de potência de redes de duas portas; estabilidade; ruído; faixa dinâmica e distorção de intermodulação; círculos de ganho constante e ruído constante; casamento conjugado simultâneo; projetos de amplificadores de ganho máximo, faixa larga, baixo ruído, de potência
- ✓ **Osciladores e misturadores**: características, modelos, componentes, configurações, projetos
- ✓ **Dispositivos semicondutores**: características e modelos de transistor bipolar e de efeito de campo; diodos varactor, Schottky, túnel e Gunn
- ✓ **Circuitos integrados**: híbrido e monolítico

Bibliografia

- ✓ David M. Pozar, [Microwave Engineering](#), Wiley, 2011, ISBN-10: 0470631554, ISBN-13: 978-0470631553.
- ✓ Guilherme Gonzalez, [Transistor Amplifiers: Analysis and Design](#), 2ª edição, Prentice Hall, 1996, ISBN-10: 0132543354, ISBN-13: 978-0132543354.
- ✓ Robert E. Collin, [Foundations for Microwave Engineering](#), 2ª edição, Wiley-IEEE Press, 2000, ISBN-10: 0780360311, ISBN-13: 978-0780360310.
- ✓ David M. Pozar, [Microwave and RF Design of Wireless Systems](#), Wiley, 2000, ISBN-10: 0471322822, ISBN-13: 978-0471322825.2.9.
- ✓ Sophocles J. Orfanidis, [Electromagnetic Waves and Antennas](#), www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/

Avaliação

✓ Média final

✓ $0,4 \times M_{PJ} + 0,4 \times M_{TS} + 0,2 \times M_{LE}$

- MPJ: média dos projetos
- MTS: média dos testes
- MLE: média das listas

Calendário de atividades 2018

Fevereiro						
DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB
25	26	27	28			
Março						
DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31
Abril						
DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					
Maio						
DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		
Junho						
DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
Julho						
DOM	SEG	TER	QUA	QUI	SEX	SÁB
1	2	3	4	5	6	7




Calendário de Testes e Listas de Exercícios			
MÊS	TESTE	LISTA	DIA
ABRIL	T1	L1	3
MAIO	T2	L2	15
JUNHO	T3	L3	26

Critério de Aprovação

A média final será: $0,4 \times M_{PJ} + 0,4 \times M_{TS} + 0,2 \times M_{LE}$

M_{PJ} : média dos projetos; M_{TS} : média dos testes;

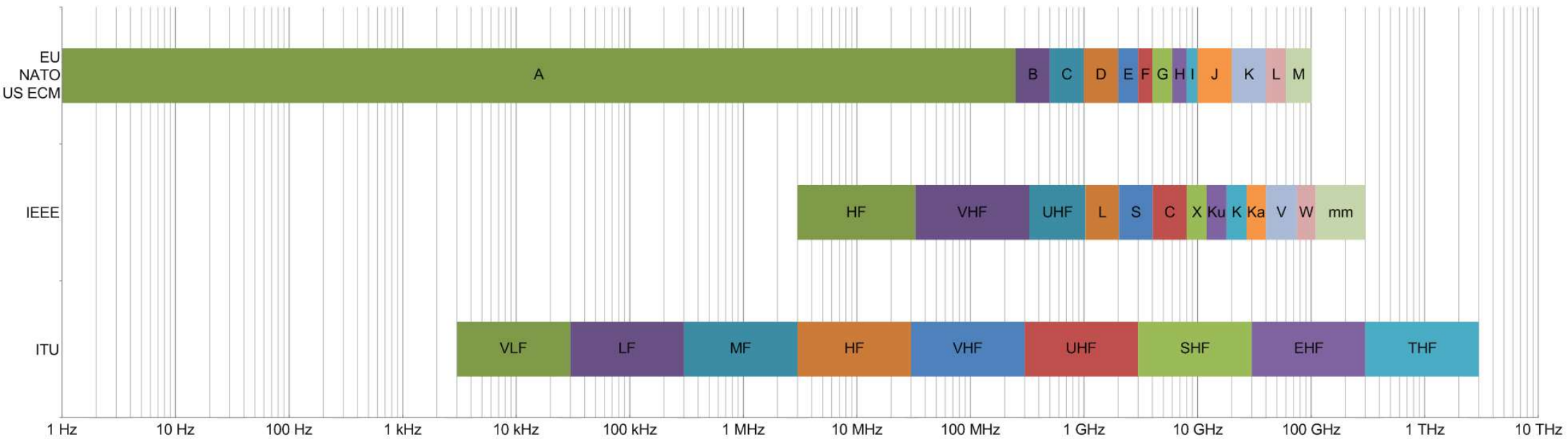
M_{LE} : média das listas de exercícios

	Início e término das aulas
	Dias sem atividades
	Dias de aulas

As informações sobre ementa, avaliação e notas de aulas estão disponíveis no site <http://disciplinas.stoa.usp.br/>

ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Denominações das faixas de frequências



ITU: International Telecommunication Union

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

NATO: North Atlantic Treaty Organization

EU: European Union

US ECM: United States Electronic Countermeasures (US ECM)

https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum

Designação das bandas e faixas de frequências

EU, NATO, US ECM		
Designação	Faixa de Frequências (GHz)	
A	0	0,25
B	0,25	0,5
C	0,5	1
D	1	2
E	2	3
F	3	4
G	4	6
H	6	8
I	8	10
J	10	20
K	20	40
L	40	60
M	60	100

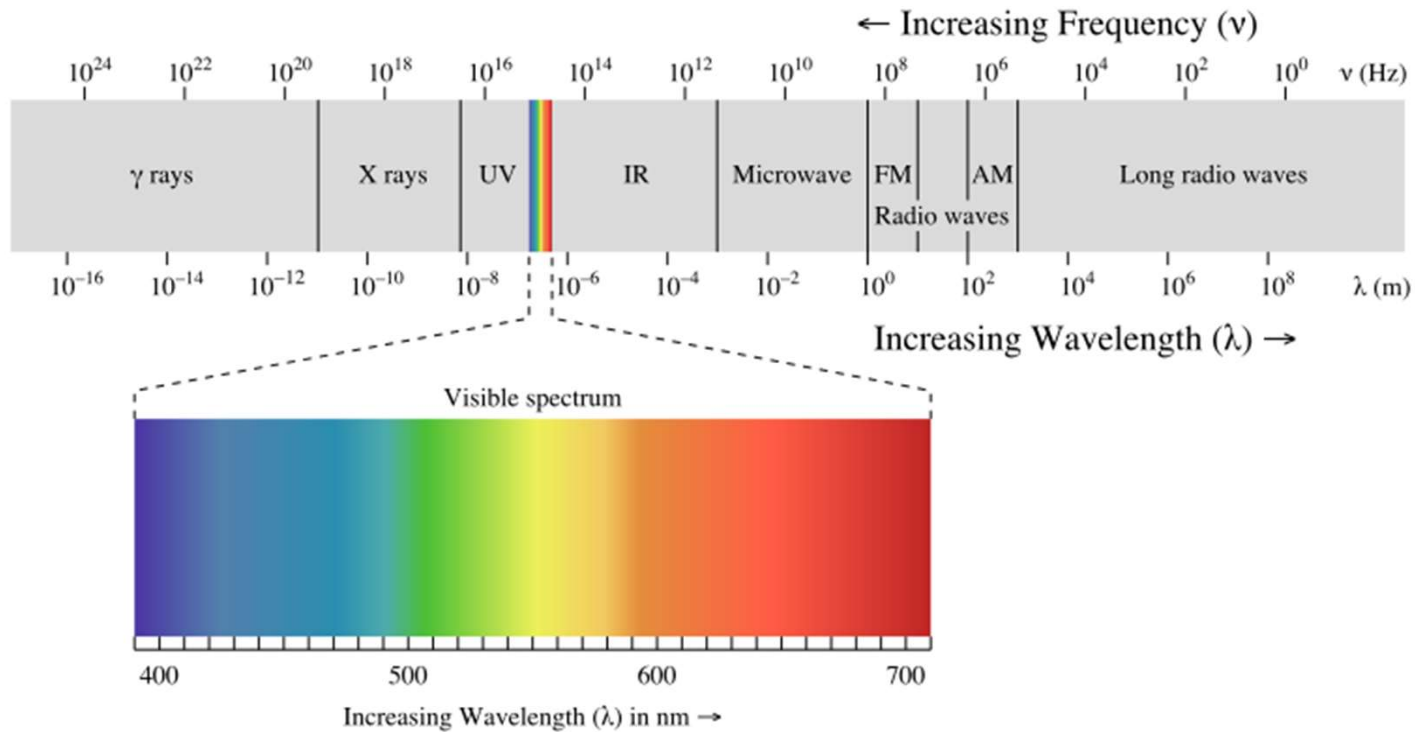
IEEE		
Designação	Faixa de Frequências (GHz)	
HF	0,003	0,03
VHF	0,03	0,3
UHF	0,3	1
L	1	2
S	2	4
C	4	8
X	8	12
K _u	12	18
K	18	27
K _a	27	40
V	40	75
W	75	110
mm (ou G)	110	300

Kurz (German for "short")
 Kurz-under
 Kurz-above

ITU			
Banda nº	Designação	Faixa de Frequências (Hz)	
4	VLF	3 k	30 k
5	LF	30 k	300 k
6	MF	300 k	3000 k
7	HF	3 M	30 M
8	VHF	30 M	300 M
9	UHF	300 M	3000 M
10	SHF	3 G	30 G
11	EHF	30 G	300 G
12	THF	300 G	3000 G

https://en.wikipedia.org/wiki/Radio_spectrum#EU,_NATO,_US_ECM_frequency_designations
<https://awt-global.com/wp3/resources/frequency-bands/>

Espectro eletromagnético (1)



<https://en.wikipedia.org/wiki/Light>

Espectro eletromagnético (2)

Designação	Faixa (GHz)	Comprimento de onda (mm)
L	1 - 2	150 – 300
S	2 - 4	75 - 150
C	4 - 8	37,5 - 75
X	8 - 12	25 – 37,5
Ku	12 - 18	16,7 - 25
K	18 – 26,5	11,3 – 16,7
Ka	26,5 - 40	5,0 – 11,3
Q	33 - 50	6,0 – 9,0
U	40 - 60	5,0 – 7,5
V	50 - 75	4,0 – 6,0
W	75 - 110	2,7 – 4,0
F	90 - 110	2,1 – 3,3
D	110 - 170	1,8 – 2,7

Espectro eletromagnético (3)

Faixa	Comprimento de onda (m)	Frequência (Hz)	Energia do fóton (eV)
Raio gama	< 0.02 n	> 15 E	> 62.1 k
Raio X	0.01 n – 10 n	30 E – 30 P	124 k – 124
Ultravioleta	10 n – 400 n	30 P – 750 T	124 – 3
Visível	390 n – 750 n	770 T – 400 T	3,2 – 1,7
Infravermelho	750 n – 1 m	400 T – 300 G	1,7 – 1,24 m
Micro-onda	1 m – 1	300 G – 300 M	1,24 m – 1,24 μ
Rádio	1 m – 100 k	300 G – 3 k	1,24 μ – 12,4 f

10^n	Prefixo	Símbolo	10^n	Prefixo	Símbolo	10^n	Prefixo	Símbolo	10^n	Prefixo	Símbolo
10^{18}	exa	E	10^9	giga	G	10^{-3}	mili	m	10^{-9}	nano	n
10^{15}	peta	P	10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ	10^{-12}	pico	p
10^{12}	tera	T	10^3	quilo	k				10^{-15}	femto	f

<https://en.wikipedia.org/wiki/Microwave>

Frequências e aplicações (1)

Band name	Frequency range	Wavelength range	Notes
HF	3–30 MHz	10–100 m	Coastal radar systems, over-the-horizon radar (OTH) radars; 'high frequency'
VHF	30–300 MHz	1–10 m	Very long range, ground penetrating; 'very high frequency'
P	< 300 MHz	> 1 m	'P' for 'previous', applied retrospectively to early radar systems; essentially HF + VHF
UHF	300–1000 MHz	0.3–1 m	Very long range (e.g. ballistic missile early warning), ground penetrating, foliage penetrating; 'ultra-high frequency'
L	1–2 GHz	15–30 cm	Long range air traffic control and surveillance; 'L' for 'long'
S	2–4 GHz	7.5–15 cm	Moderate range surveillance, Terminal air traffic control, long-range weather, marine radar; 'S' for 'short'
C	4–8 GHz	3.75–7.5 cm	Satellite transponders; a compromise (hence 'C') between X and S bands; weather; long range tracking
X	8–12 GHz	2.5–3.75 cm	Missile guidance, marine radar, weather, medium-resolution mapping and ground surveillance; in the United States the narrow range 10.525 GHz \pm 25 MHz is used for airport radar; short range tracking. Named X band because the frequency was a secret during WW2.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

Frequências e aplicações (2)

Band name	Frequency range	Wavelength range	Notes
K _u	12–18 GHz	1.67–2.5 cm	High-resolution, also used for satellite transponders , frequency under K band (hence 'u')
K	18–24 GHz	1.11–1.67 cm	From German <i>kurz</i> , meaning 'short'; limited use due to absorption by water vapour, so K _u and K _a were used instead for surveillance. K-band is used for detecting clouds by meteorologists, and by police for detecting speeding motorists. K-band radar guns operate at 24.150 ± 0.100 GHz.
K _a	24–40 GHz	0.75–1.11 cm	Mapping, short range, airport surveillance ; frequency just above K band (hence 'a') Photo radar, used to trigger cameras which take pictures of license plates of cars running red lights, operates at 34.300 ± 0.100 GHz.
mm	40–300 GHz	1.0–7.5 mm	Millimeter band, subdivided as below. The frequency ranges depend on waveguide size. Multiple letters are assigned to these bands by different groups. These are from Baytron, a now defunct company that made test equipment.
V	40–75 GHz	4.0–7.5 mm	Very strongly absorbed by atmospheric oxygen, which resonates at 60 GHz.
W	75–110 GHz	2.7–4.0 mm	Used as a visual sensor for experimental autonomous vehicles, high-resolution meteorological observation, and imaging.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Radar>

Dispositivos passivos

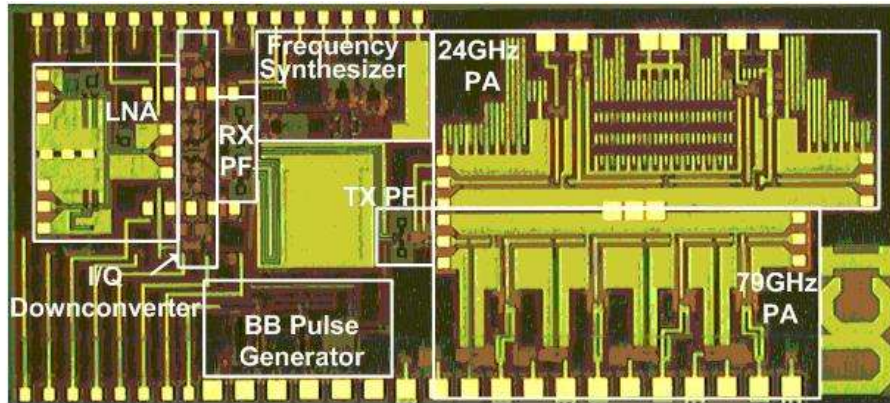


<http://www.cobham.com/>

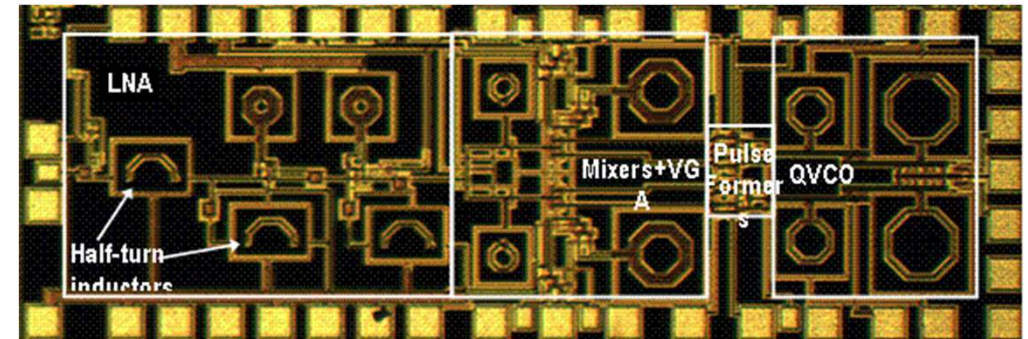


<https://www.pasternack.com/>

Circuito integrado



Die micrograph of the 3.9x1.9-mm² dual-band 22-29-GHz/77-81-GHz BiCMOS Transceiver for Automotive Radars (ISSCC 2009 and JSSC Special Issue for ISSCC 2009)



Die micrograph of a 22-29GHz UWB Pulse-Radar Receiver front-end measuring 3mmx1mm (CICC 2007 and T-MTT Aug. 2009)

Silicon-Based (Sub)-Millimeter-Wave IC Design.
Nanoscale Communication Integrated Circuits (NCIC) Labs
University of California, Irvine.
<http://ncic.eng.uci.edu/research/silicon-based-sub-millimeter-wave-ic-design/>

Válvulas para microondas

- ✓ Dispositivos para uso até 1 GHz
 - triodos; tetrodos; pentodos
 - fatores limitantes
 - capacitância entre os eletrodos
- ✓ Dispositivos para uso acima de 1 GHz
 - Klystron; TWT; Magnetron; Gyrotrons
 - potências desde centenas de mW até MW
 - frequências até 100 GHz

Aplicação
Radar banda-W
guia WR-10
(2.54 x 1.27 mm)



Klystron Varian
modelo VKB 2445 SERIES
93 - 96 GHz

Desempenho elétrico típico

- frequência central 93.8 GHz
- potência de saída (pico) 1.4 kW
- ciclo de trabalho 0.5%
- sintonia eletrônica (-3dB) 200 MHz
- faixa de sintonia mecânica ± 1 GHz
- largura de pulso até 20 ms
- tensão no cátodo 20.3 kV
- corrente de cátodo (pico) 690 mA
- tensão de grade (pulsada) 3.1 kV

Rádio (1)

Potência transmitida, dBm							
Modulação/Freq (GHz)	6-8	11-15	18-23	26	28	36	38
QPSK	26	24	22	21	14	12	18
8PSK	26	24	22	21	14	12	18
16QAM	25	23	21	20	14	11	17
32QAM	24	22	20	19	14	10	16
64QAM	24	22	20	19	14	10	16
128QAM	24	22	20	19	14	10	16
256QAM	22	20	18	17	12	8	14

Alloyant Wireless Technologies
<http://www.alloyant.com/products-ptp-specifications.html>

Rádio (2)



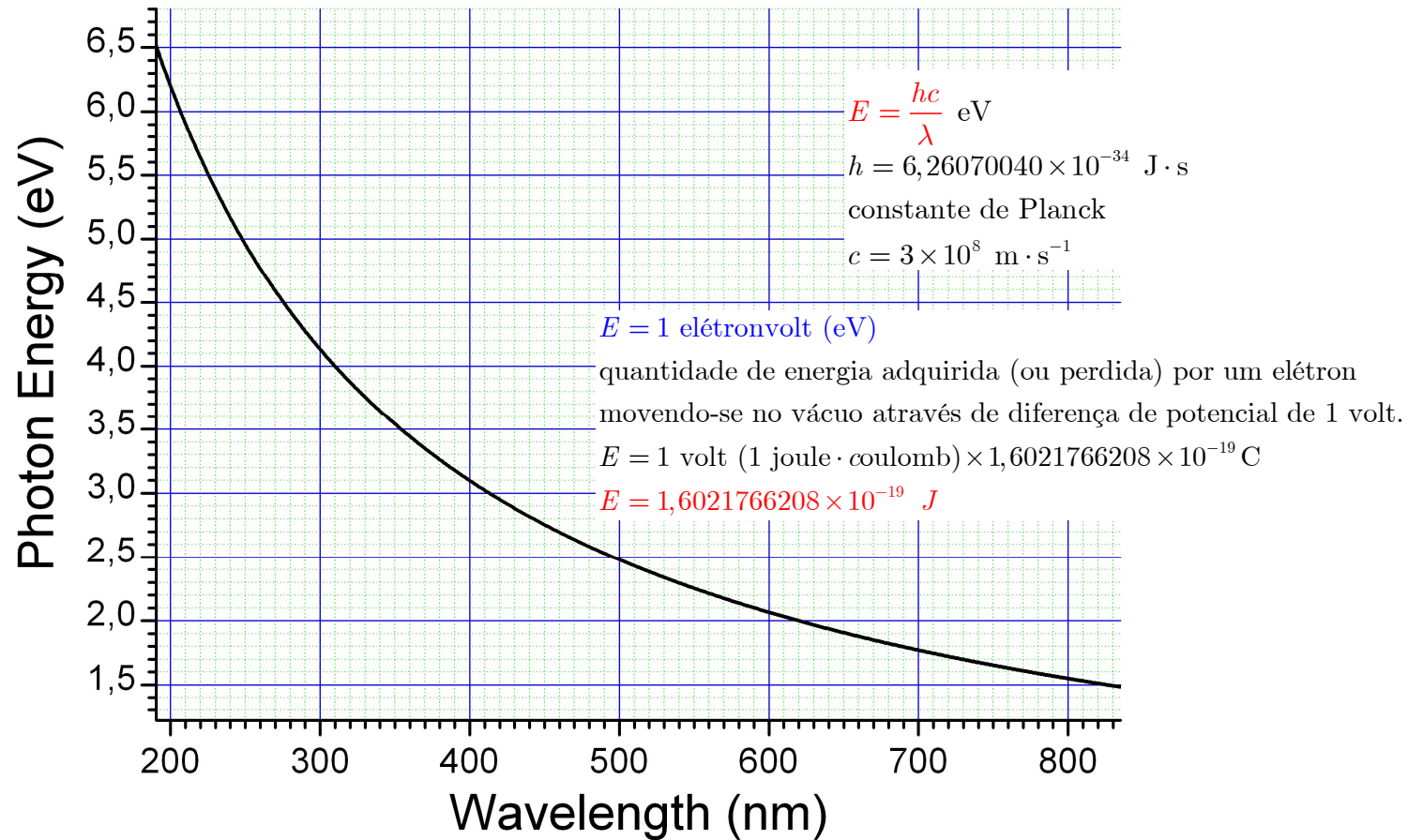
<http://www.racom.eu/>

5G: faixa de frequências

Área	Faixa (MHz)
Europa	3400 a 3800
China	3300 a 4200; 4400 a 4900
Japão	3600 a 4200; 4400 a 4900
Coreia	3400 a 3700
USA	3100 a 3550; 3700 a 4200

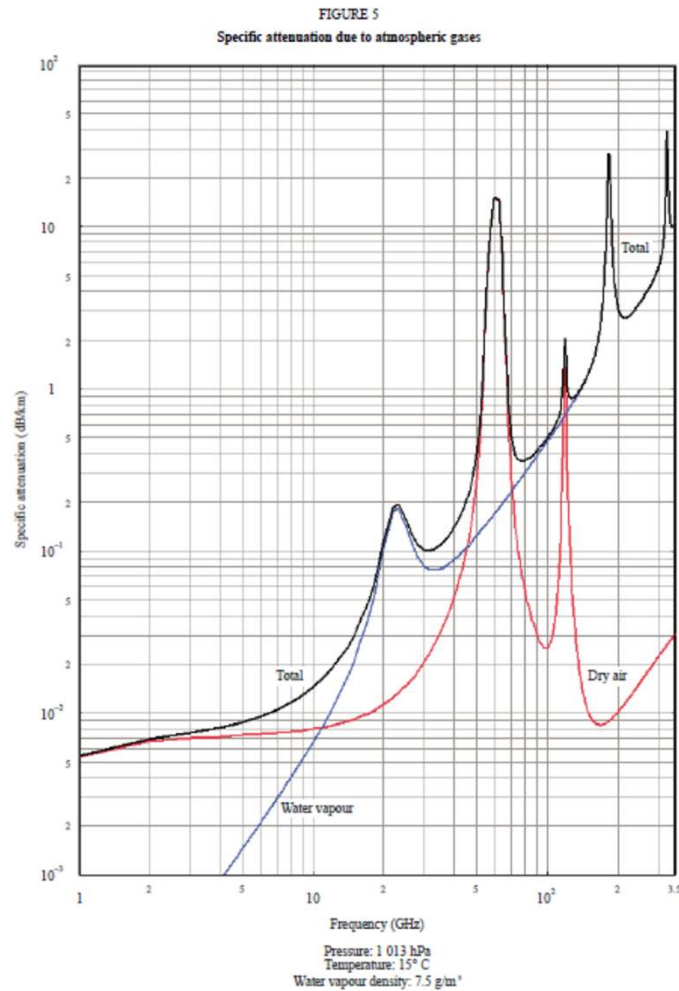
Área	Faixa (GHz)	Lançamento/testes
USA	27,5 a 28,35 e 37 a 40	2018 pré-comercial
Coreia	26,5 a 29,5	2018 (teste); 2019 (comercial)
Japão	27,5 a 28,28	2017 (teste); 2020 (comercial)
China	24,25 a 27,5 GHz e 37 a 43,5	estudos
Suécia	26,5 a 27,5	2018 licenças
Europa	24,25 – 27,5	2020 comercial

Energia do fóton



<https://en.wikipedia.org/wiki/Electronvolt>

Atenuação atmosférica (ITU-R)



Pressão atmosférica: 1013 hPa (hPa: hectopascal. 1 hPa = 100 pascals)

Temperatura: 15 °C

Densidade de vapor de água: 7,5 g·m⁻³

ITU-R, Ed., "Attenuation by atmospheric gases: ITU-R P.676-10," 2013

Rec. ITU-R P.676-10

https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-10-201309-S!!PDF-E.pdf

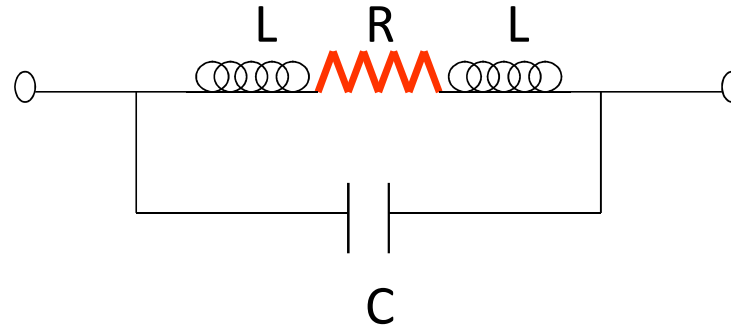
Componentes discretos

COMPONENTES BÁSICOS

Componentes básicos

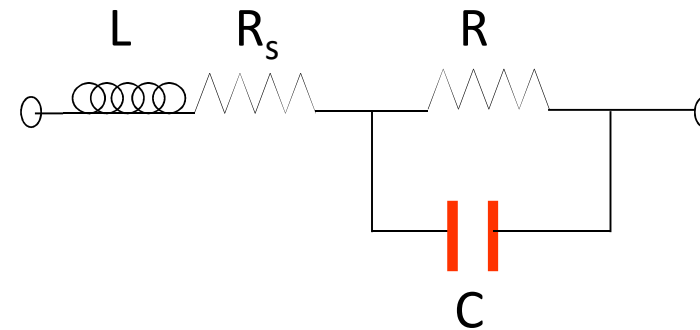
✓ Resistor

- filme metálico sobre substrato de alumina ou Berílio
- reatância parasita reduzida até 2 GHz



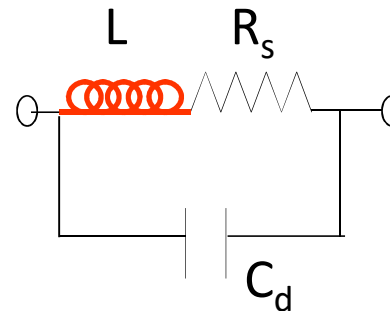
✓ Capacitor

- filme metalizado sobre polistireno
- teflon
- policarbonato

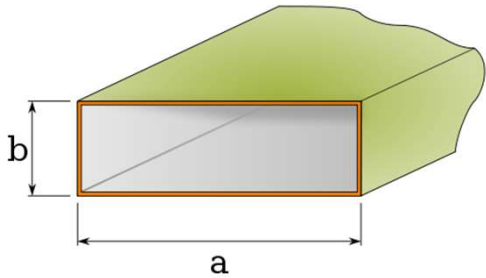


✓ Indutor

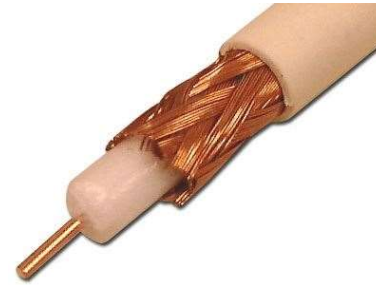
- planar ou fio



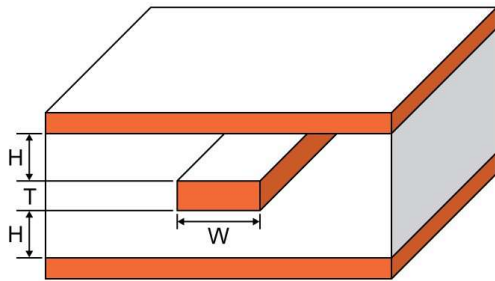
Tipos de condutores (guias)



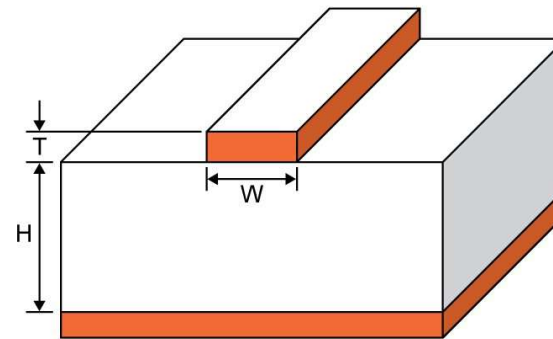
metálico retangular



coaxial

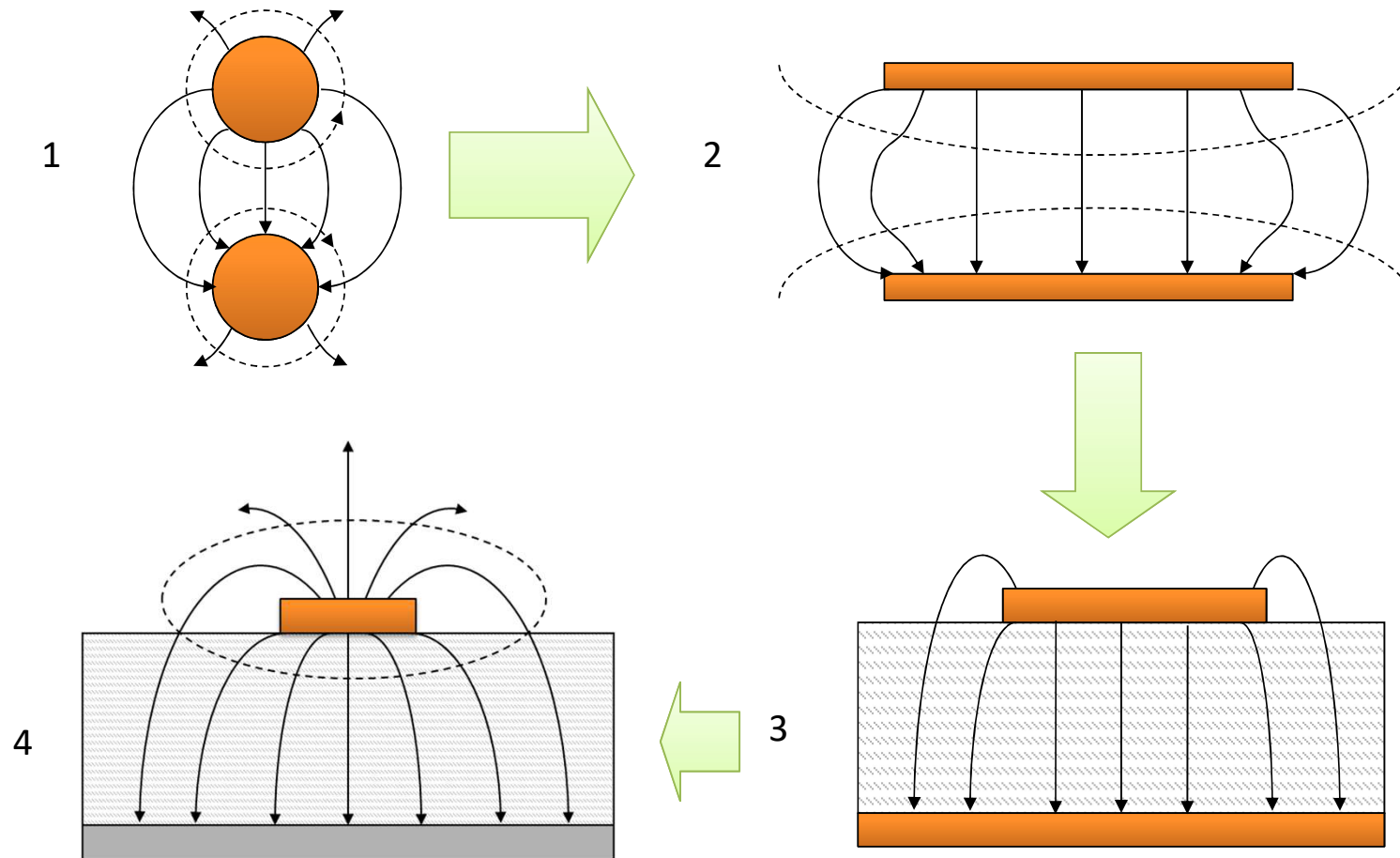


linha de fita

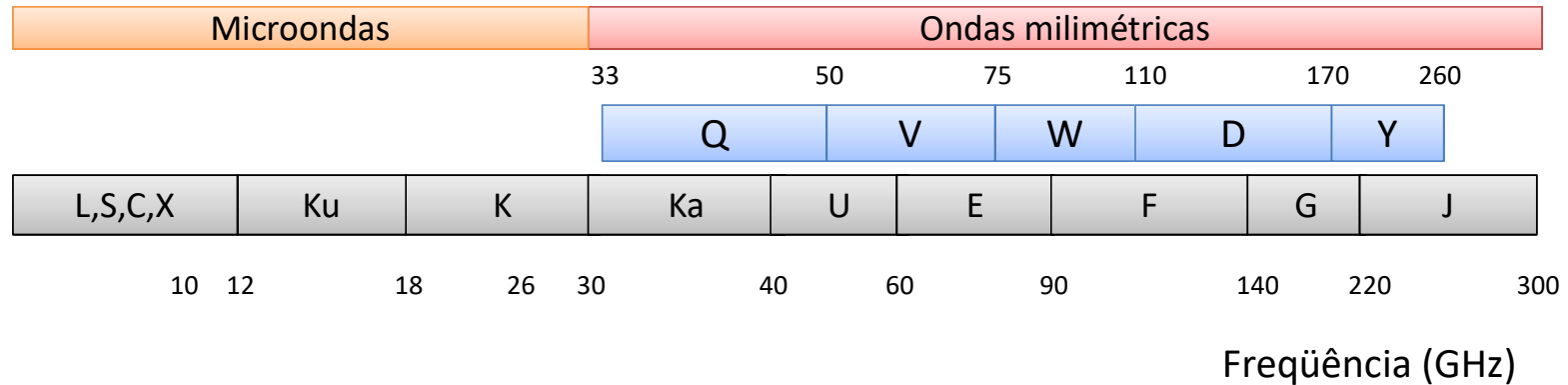


microfita

Da linha de 2 fios à microfita



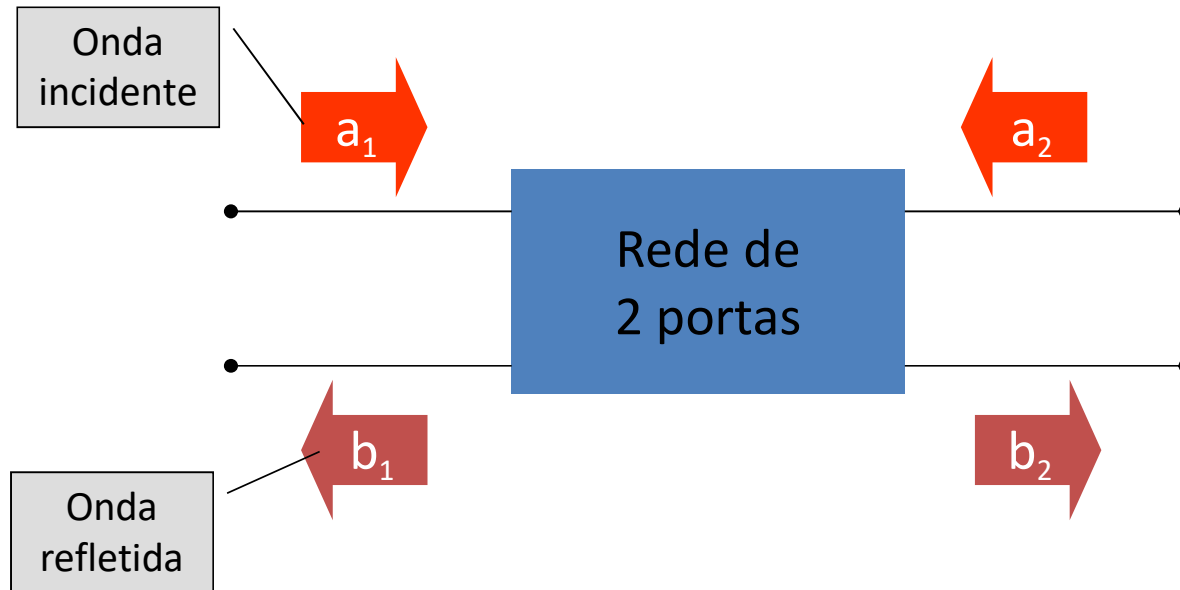
Faixa de operação de algumas linhas



Fonte: B. Bhat e S. K. Koul, Analysis, design and applications of fin lines, Norwood: Artech House, p. 43, 1987

ANÁLISE DE CIRCUITOS EM MICRO-ONDAS

Análise de circuitos em altas freqüências



$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Matriz espalhamento

Diagrama de blocos de amplificador de microondas

