

PSI3481 SISTEMAS ÓPTICOS E DE MICRO-ONDAS

SISTEMAS DE MICRO-ONDAS **Introdução e aplicações**

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra

Sumário

- Aspectos históricos
- Aplicações de RF e micro-ondas
- Espectro eletromagnético
- Níveis seguros de radiação
- Unidades de frequência, ganho e potência

Micro-ondas

- O que é “micro-ondas”?
- Resposta do público em geral:



- Errado?
- Nem tanto!
- Esse é um forno que usa micro-ondas para aquecer os alimentos

Micro-ondas: ondas de energia eletromagnética

Energia Eletromagnética

- Energia eletromagnética
 - Gerada por cargas elétricas em movimento
 - Propaga-se em ondas no vácuo e em meios materiais
- Ondas eletromagnéticas
 - Previstas pelas equações de Maxwell
 - Compostas por campo elétrico e magnético associados
- Classificadas conforme sua frequência ou comprimento de onda
 - Ondas de rádio ou RF → 30 KHz a 300 MHz
 - **Micro-ondas** → **300 MHz a 300 GHz**
 - Infravermelho → 1 mm a 800 nm
 - Luz visível → 800 nm a 380 nm

	} Frequência
	} Comprimento de onda



ASPECTOS HISTÓRICOS

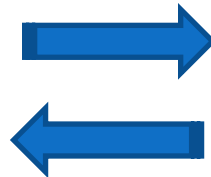
Aspectos Históricos

- James Clerk Maxwell – 1864
 - Equações dos campos elétrico e magnético

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Campo Elétrico
variável no tempo



Campo Magnético
variável no tempo

- **Prevê**
 - Existência de ondas eletromagnéticas
 - Que se propagam no espaço

Aspectos Históricos

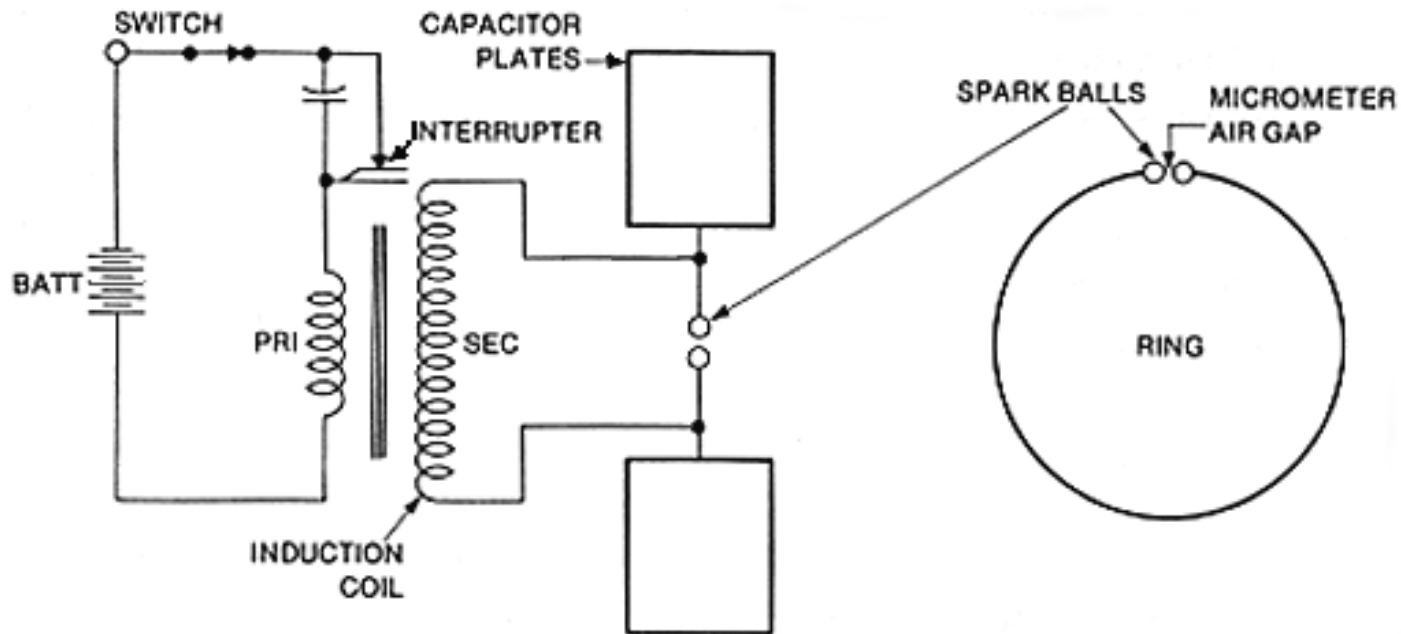
- **Heinrich Rudolph Hertz**
 - Experiências entre 1873 e 1891
 - Demonstração experimental da existência de ondas eletromagnéticas
 - Experimento

Gerador de faísca \Leftrightarrow Anel metálico com fenda

- Detecta a faísca à distância!
- Onda EM propagou-se pelo ar!

Aspectos Históricos

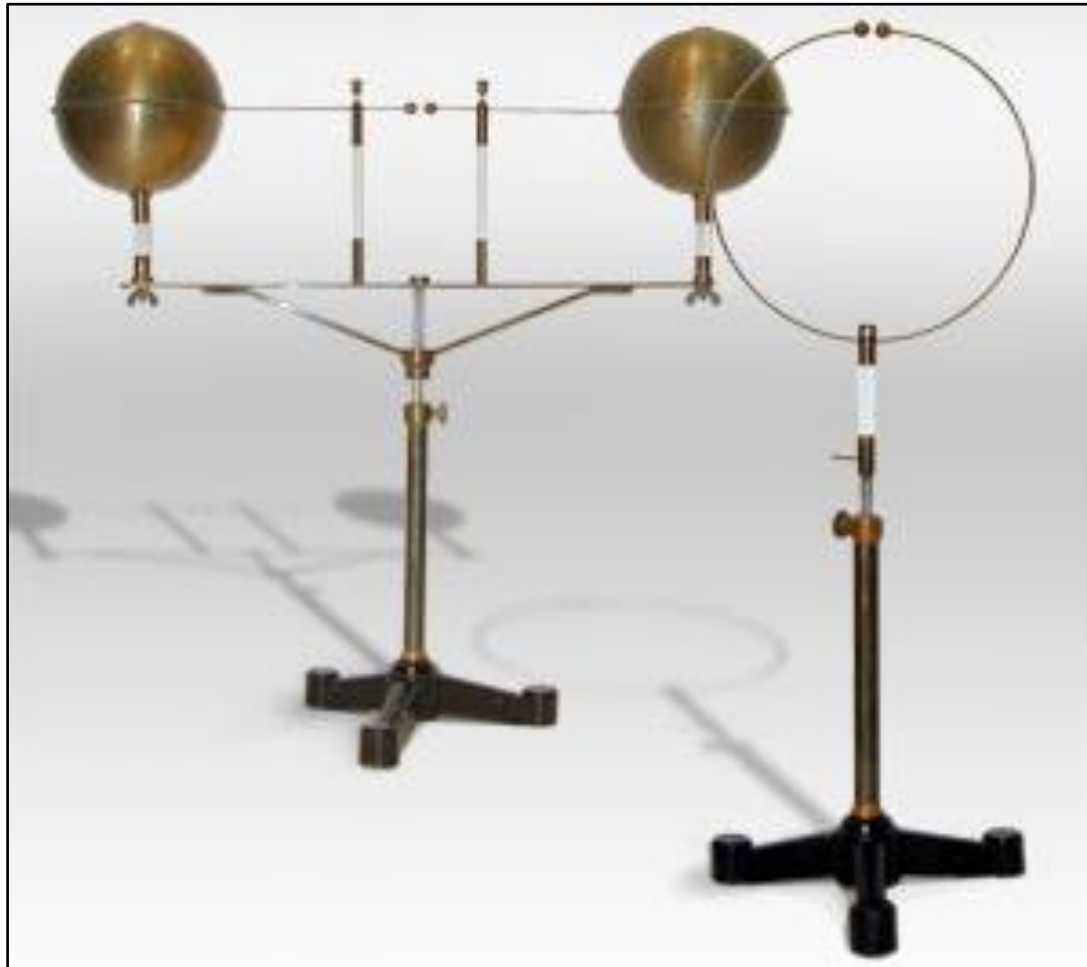
- Experimento de Hertz



Gerador de faísca
cria onda EM

Detector de faísca
à distância

Aspectos Históricos



Experimento de Hertz

Aspectos Históricos

Guglielmo Marconi

(1874 a 1937)

1º engenheiro de micro-ondas

“Pai da radiotransmissão à longa distância”



1896 - Invenção do telégrafo sem fio

1899 - Transmissão de código Morse através do Canal da Mancha

1905 – Patente de antenas direcionais de alto ganho

Aspectos Históricos

1901 - Inaugura a comunicação sem fio transoceânica

1912 - Telégrafo sem fio do Titanic auxilia no resgate

1931 – Inauguração do Cristo Redentor

- Marconi acendeu a iluminação da estátua apertando um botão em Roma
- Más condições do tempo atrapalharam o experimento
- Iluminação foi acesa por sinal retransmitido por um barco



Aspectos Históricos

Antes da 2ª Guerra Mundial...

- Rádio e TV
 - Impacto social \Rightarrow informação rápida e para todos
- **RADAR** operando em micro-ondas
 - Objetivo: detectar aviões e navios
 - Válvula Klystron
 - geração e amplificação em micro-ondas
 - Guias de ondas
 - condução de micro-ondas com baixas perdas

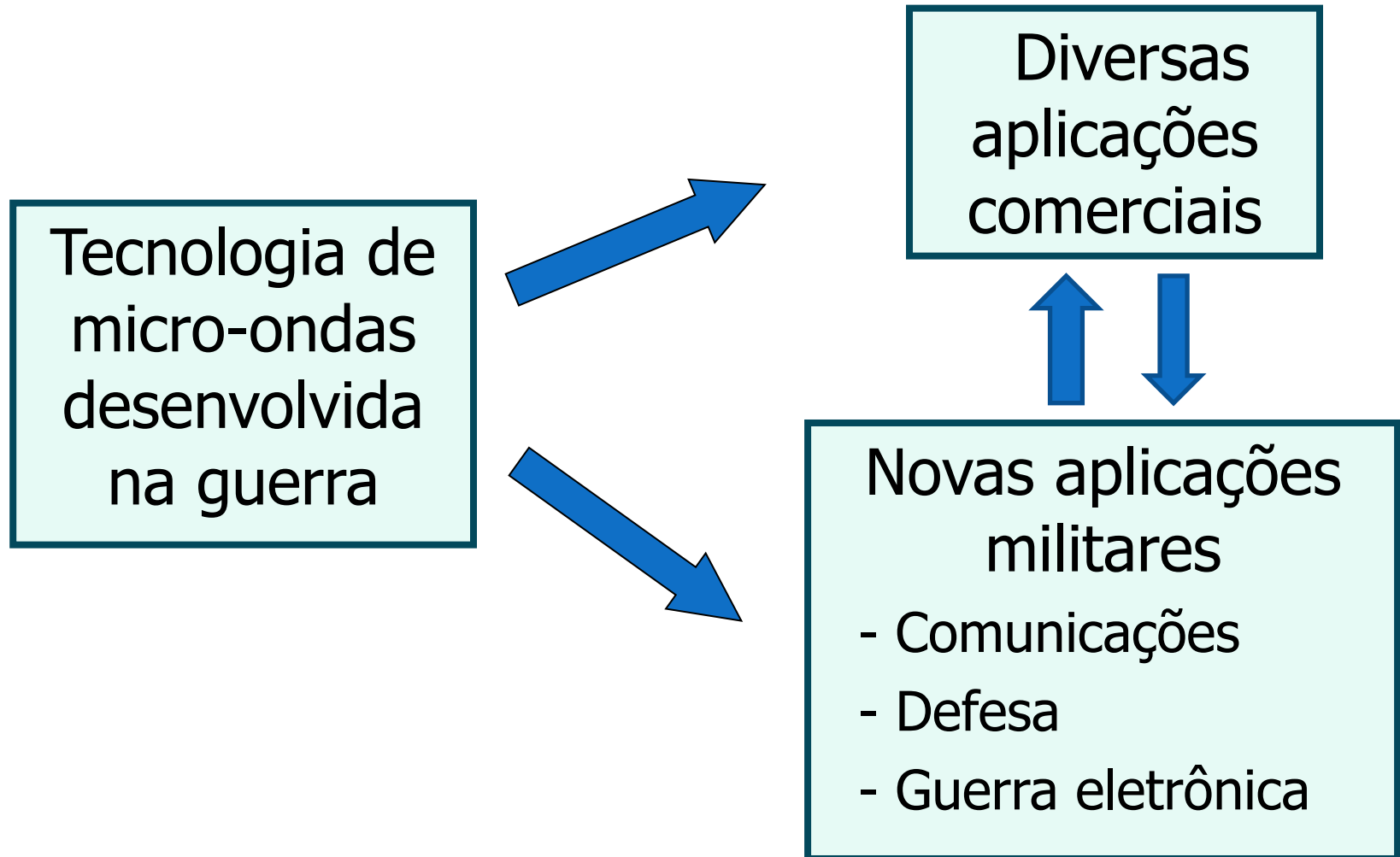
Aspectos Históricos

Durante a 2ª Guerra Mundial (1939 a 1945)

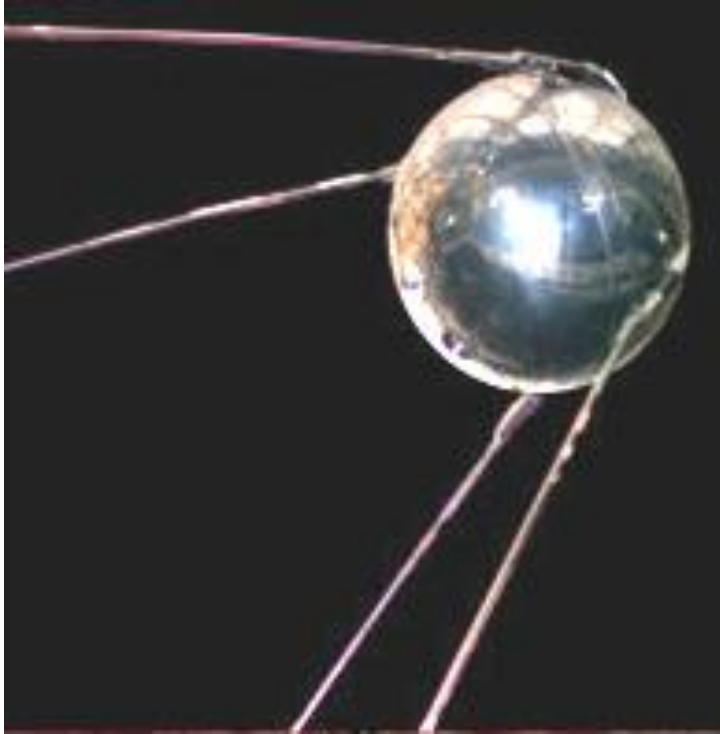
- Uso militar do RADAR
 - Em navios - 3 GHz
 - Em aviões - 10 GHz
- Detecção de aviões inimigos
- Detecção de comboios de navios com suprimentos
- Pós-guerra
 - RADAR \Rightarrow aviação civil e marinha mercante



Pós 2ª Guerra Mundial



Comunicação via Satélite



Satélite artificial Sputnik

- Lançado em 1957
- Orbitou a Terra por 3 meses
- Emitiu sinais de 20 e 40 MHz
- Operou por 22 dias

Início da “Era dos satélites de comunicação”

- Todo o planeta conectado em tempo real
- Pela primeira vez na história da humanidade

Comunicação via Satélite

No Brasil...

- 1965 – primeiros testes de transmissões de TV via satélite
- 1969 – recepção de imagens da chegada do Homem à Lua
- 1970 – transmissão ao vivo em rede nacional da Copa do México



1970 - Carlos Alberto, Brito, Piazza, Félix, Clodoaldo e Everaldo. Jairzinho, Rivelino, Tostão, Pelé e Paulo César.

Brasil tricampeão do mundo!



APLICAÇÕES DE RF E MICRO-ONDAS

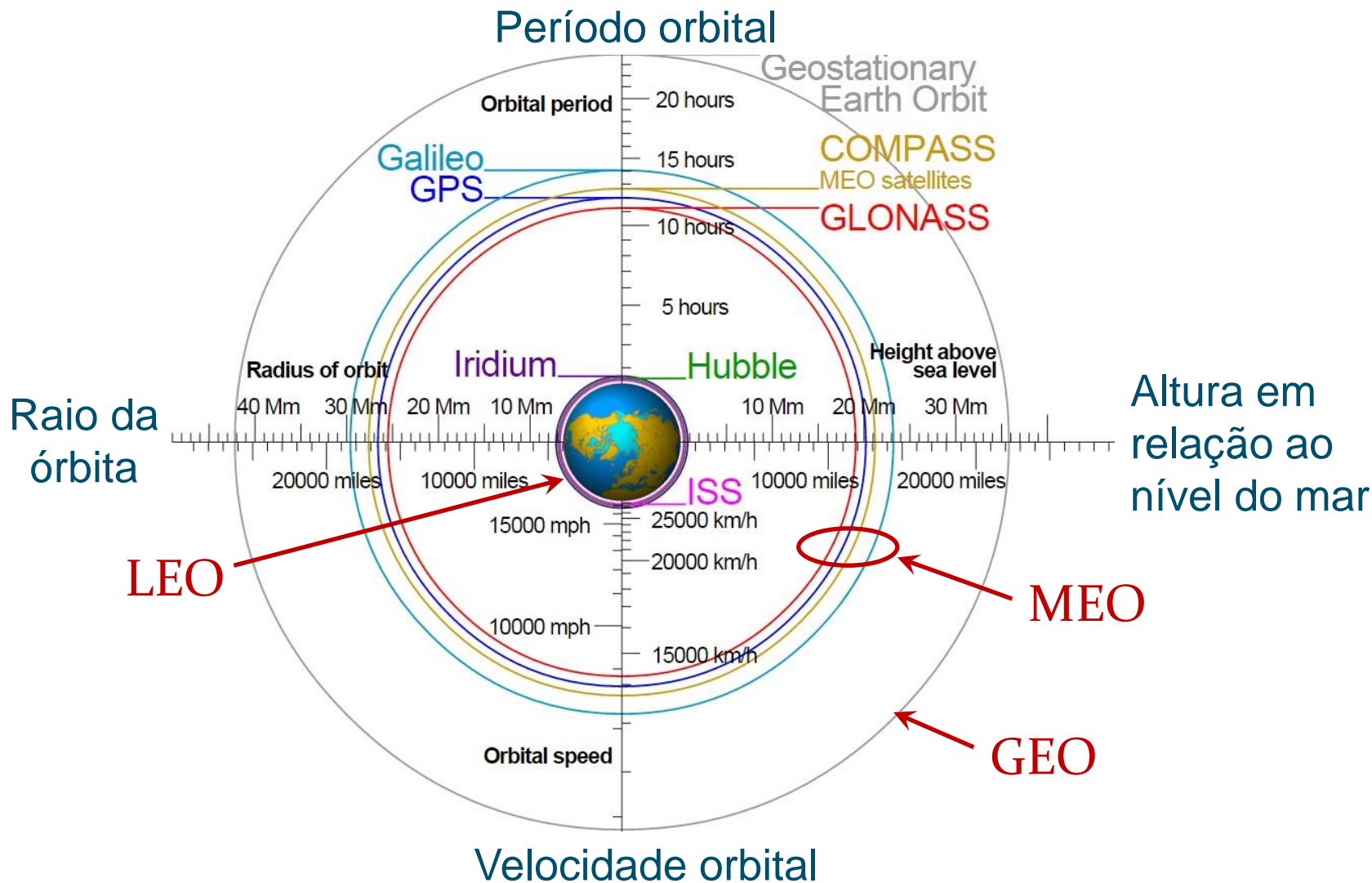
Sistemas de Satélites Artificiais



Sistemas de Satélites Artificiais

- Atualmente
 - \approx 3.000 satélites ativos em órbita da Terra
- Classificação em função da altura da órbita
 - **GEO** - Geosynchronous Earth Orbit
 - **MEO** - Medium Earth Orbit
 - **LEO** - Low Earth Orbit

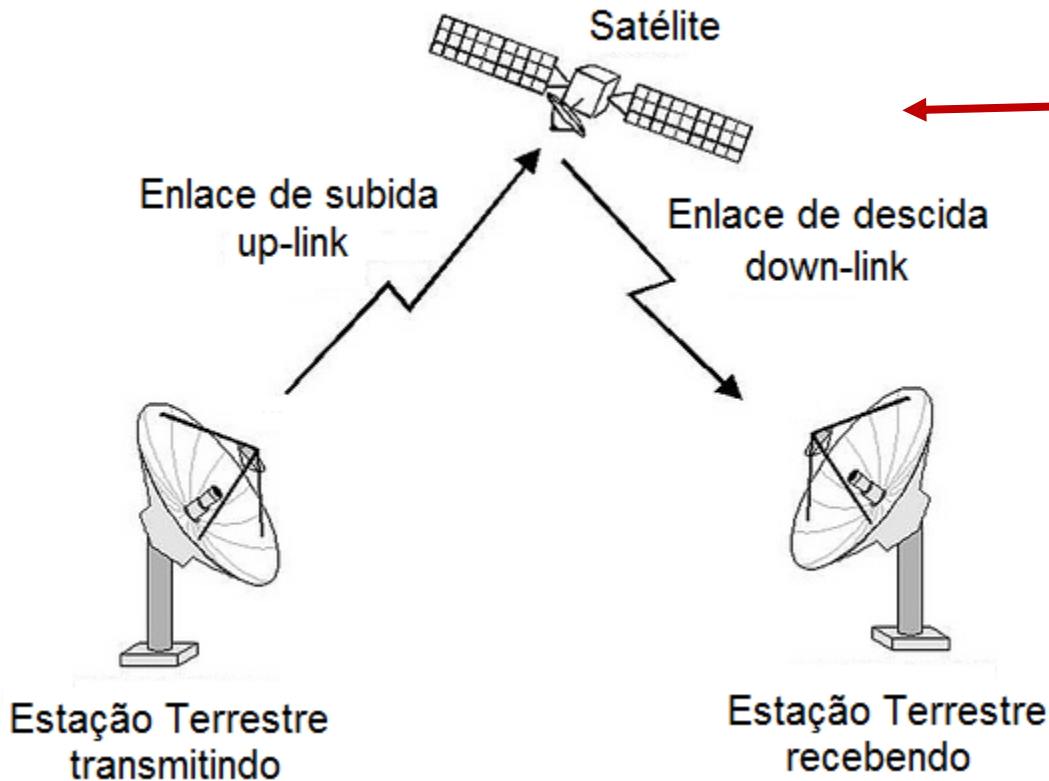
Órbitas de satélites artificiais ao redor da Terra



Sistemas de Satélites Artificiais

- Sistemas com satélites artificiais **GEO**
 - GEO - Geosynchronous Earth Orbit
 - Satélites em **geossíncrona órbita ou geoestacionária**
 - Órbita de ≈ 36.000 km acima do nível do mar
(Raio da Terra: 6.378 km)
 - Orbitam sobre a Linha do Equador
 - Período orbital igual ao da Terra (24 h)
 - Posição fixa em relação ao solo

Satélite Geoestacionário



Satélite

- receptor
- transmissor
- antenas
- painéis solares

Estação Terrestre
transmitindo

Estação Terrestre
recebendo

Estações terrestres

- receptor, transmissor e antena

Comunicação
intercontinental

Satélites
geoestacionários

$H \cong 36.000 \text{ km}$

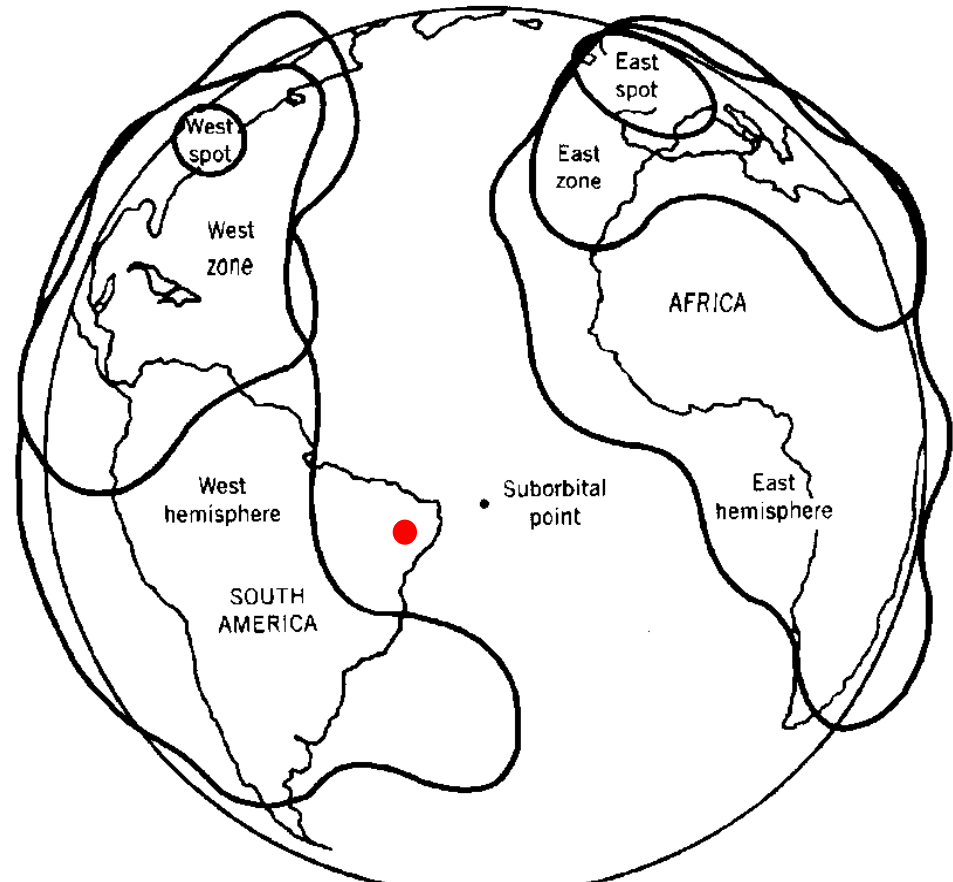
Sistemas de Satélites Artificiais

- Sistemas com satélites artificiais **GEO**
 - Exemplos
 - Satélites de comunicações → voz, imagem e dados
 - Consórcio INTELSAT – mais de 50 satélites
 - comunicações internacionais
 - Consórcio INMARSAT – comunicações marítimas
 - Sistemas DBS - Direct Broadcast System
 - Recepção direta de TV via satélite

Satélite Geoestacionário

Satélite atlântico INTELSAT V - GEO

Cobertura das antenas do satélite



Sistemas de Satélites Artificiais

- Sistemas com satélites artificiais **GEO**
 - Cobertura de grandes áreas
 - 3 satélites **GEO** podem conectar todo o planeta
 - Na prática, ligações telefônicas transcontinentais usam
 - satélite artificial, em um dos sentidos da comunicação
 - cabo submarino, no outro sentido de comunicação
 - minimização do atraso do sinal devido ao tempo de propagação

Sistemas de Satélites Artificiais

- Sistemas com satélites artificiais **MEO**
 - MEO – **Medium Earth Orbit**
 - Órbita intermediária entre GEO e LEO
 - Movem-se em relação ao solo
 - Exemplo – **GPS – Global Positioning System**
 - Órbita de 20.200 km
 - Período orbital de 12 horas
 - 24 satélites ativos e 3 de reserva
 - Usuário precisa detectar 4 ou mais satélites para determinação de seu posicionamento

Sistemas de Satélites Artificiais

- Sistemas com satélites artificiais **LEO**
 - LEO – **Low Earth Orbit**
 - Órbitas de 500 a 2.000 km, em geral
 - Período orbital bem menor que o da Terra
→ por exemplo, 1h30min
 - Movem-se em relação ao solo
 - Ficam “visíveis” ao usuário por tempo determinado
 - Sistemas precisam de vários satélites

Sistemas de Satélites Artificiais

- Exemplos de sistemas **LEO**
 - Telefone direto por satélite
 - Satélites de observação da Terra
 - Satélites espões
 - Estações e telescópios espaciais
- Telefone via satélite
 - Vantagem: Cobertura global
 - Desvantagem: Alto custo
- Operadores de telefone via satélite
 - Sistema Globalstar – 48 satélites
 - Sistema Iridium – 66 satélites



Sistemas de Entretenimento

- TV digital
 - Canais abertos de TV
- DBS
 - *Direct Broadcasting System*
 - Recepção direta de TV via satélite
 - Frequências de micro-ondas



Sistemas Terrestres sem Fio

- Telefonia celular
- WLAN – Wireless Local Area Network
 - Redes locais de computadores

Sistemas de Comunicação sem Fio

- RFID – *Radio Frequency Identification*
 - Sistemas para identificação por sinais de rádio
- Bluetooth e WiFi

Aplicações Domésticas de Micro-ondas

- Telefone sem fio



- Roteador sem fio



- Forno de micro-ondas



- Fone de ouvido sem fio



RADAR

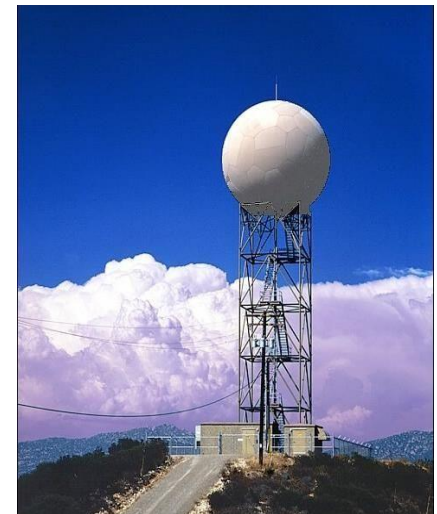
- **Radares militares**
 - Detecção de alvos
- **Radares civis**
 - Radar para monitoramento de tráfego aéreo



- Radar Doppler para medir velocidade



- Radar meteorológico



Funcionamento do Radar

Metal reflete micro-ondas

• Radar Pulsado

- Emite pulso de micro-ondas
- Em uma dada direção
- No instante

$$t = t_1$$

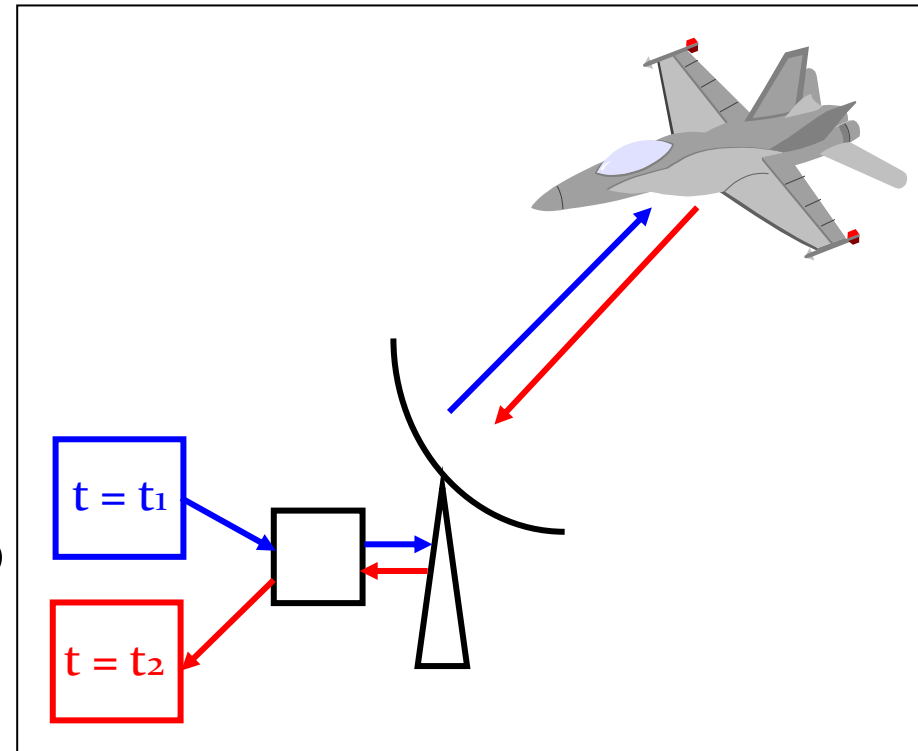
• Se houver um alvo nessa direção

- Radar recebe pulso refletido pelo alvo em

$$t = t_2$$

• Tempo de percurso radar/alvo

$$t = (t_2 - t_1)/2 = \Delta t/2$$



- Distância alvo-radar

$$d = c \cdot (t_2 - t_1)/2 = c \cdot \Delta t/2$$

c: velocidade da luz no vácuo

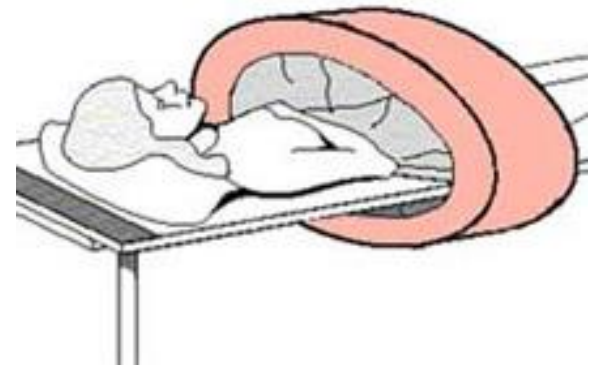
Aplicações Médicas e Industriais

- **Medicina**

- Radiômetro - detecção de tumores
- Hipertermia - tratamento de tumores

- **Aplicações industriais**

- Aquecimento por micro-ondas
- Secagem de grãos



Aplicações em Astronomia

- Radiotelescópios
 - Medem emissões de ondas EM por corpos celestes



Rede de antenas de
radioastronomia

“Escutando” o
Universo

Compatibilidade EM

- Como convivem todos os sistemas de comunicação sem fio?
- Como é minimizada a interferência entre esses sistemas?

Regulamentação do espectro eletromagnético



ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Regulamentação e Aplicações

Espectro Eletromagnético

- Conjunto de frequências que formam a energia eletromagnética
 - Composto por bandas de frequência
- Uso do espectro eletromagnético
 - Regulamentado por agências internacionais e nacionais
 - Objetivo de minimizar interferências eletromagnéticas
- Agências regulamentadoras
 - Para cada aplicação que usa ondas eletromagnéticas, define
 - Banda de frequência a ser utilizada
 - Máxima potência que pode ser radiada
 - Objetivo: minimizar interferências eletromagnéticas

Espectro Eletromagnético

Faixa de frequência	Comprimento de onda no vácuo*	Denominação oficial	Tipo de onda
30 a 300 Hz	10.000 a 1.000 km	ELF	
300 a 3.000 Hz	1.000 a 100 km	VF	Ondas de voz
3 a 30 kHz	100 a 10 km	VLF	Ondas muito longas
30 a 300 kHz	10 a 1 km	LF	Ondas longas
300 a 3.000 kHz	1.000 a 100 m	MF	Ondas médias
3 a 30 MHz	100 a 10 m	HF	Ondas curtas
30 a 300 MHz	10 a 1 m	VHF	Ondas muito curtas

* $\lambda = c/f$ sendo $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, velocidade da luz no vácuo

Espectro Eletromagnético

Faixa de frequência	Comprimento de onda no vácuo*	Denominação oficial	Tipo de onda
300 a 3.000 MHz	100 a 10 cm	UHF	Micro-ondas
3 a 30 GHz	10 a 1 cm	SHF	Micro-ondas
30 a 300 GHz	1 cm a 1 mm	EHF	Micro-ondas (milimétricas)
300 a 3.000 GHz	1 mm a 100 μm	Sem designação	Ondas sub-milimétricas
0,3 a 375 THz	1 mm a 800 nm	Infravermelho	Faixa de luz
375 a 790 THz	800 a 380 nm	Luz visível	Faixa de luz
790 a 22.500 THz	380 a 13 nm	Ultravioleta	Faixa de luz

* $\lambda = c/f$ sendo $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, velocidade da luz no vácuo

Bandas de micro-ondas

Designação	Faixa de frequência
Banda L	1-2 GHz
Banda S	2-4 GHz
Banda C	4-8 GHz
Banda X	8-12 GHz
Banda Ku	12-18 GHz
Banda K	18-26 GHz
Banda Ka	26-40 GHz

Designação	Faixa de frequência
Banda Q	33-50 GHz
Banda U	40-60 GHz
Banda V	50-75 GHz
Banda E	60-90 GHz
Banda W	75-110 GHz
Banda D	110-170 GHz
Banda G	140-220 GHz
Banda Y	220-325 GHz

Agências Reguladoras

ITU-T

International Telecommunication Union - Telecommunication

- Padronização internacional das telecomunicações

FCC

Federal Communications Commission

- Órgão federal norte-americano
- Regulamentação e fiscalização das telecomunicações e radiodifusão nos Estados Unidos

Agências Reguladoras

ANATEL

Agência Nacional de Telecomunicações

- Órgão federal brasileiro
- Regulamentação e fiscalização das telecomunicações e radiodifusão no Brasil

TIA

Telecommunication Industry Association

- Reúne indústrias de telecomunicações

Regulamentação do Espectro EM



Faixas de frequência licenciadas

- Serviços profissionais de comunicação
- São leiloadas pelos governos



Faixas de frequência de uso livre

- Bandas **ISM**
- **Industrial, Scientific and Medical**
- Aplicações industriais, científicas e médicas

Aplicações de frequências licenciadas

- Radiodifusão – TV e rádio
- Sistemas de comunicações
 - Enlaces terrestres
 - Via satélite
- TV via satélite
- Satélites de observação da Terra
- Sistemas de posicionamento global – GPS
- Sistemas RADAR
- Radioastronomia

Máxima potência radiada depende da aplicação

Exemplos de Frequências Licenciadas

Faixas de frequência	Aplicação
54 a 88 MHz	Canais 2 a 6 de TV Analógica – VHF ^{1,2}
89 a 173 MHz	Estações de Rádio FM
174 a 216 MHz	Canais 7 a 13 de TV Analógica – VHF ^{1,2}
470 a 608 MHz	Canais 14 a 36 de TV Digital – UHF ¹
608 a 614 MHz	Radioastronomia
614 a 806 MHz	Canais 38 a 69 de TV Digital – UHF ¹

¹BW = 6 MHz ² Extinta em 29 /03/2017 na região metropolitana de São Paulo

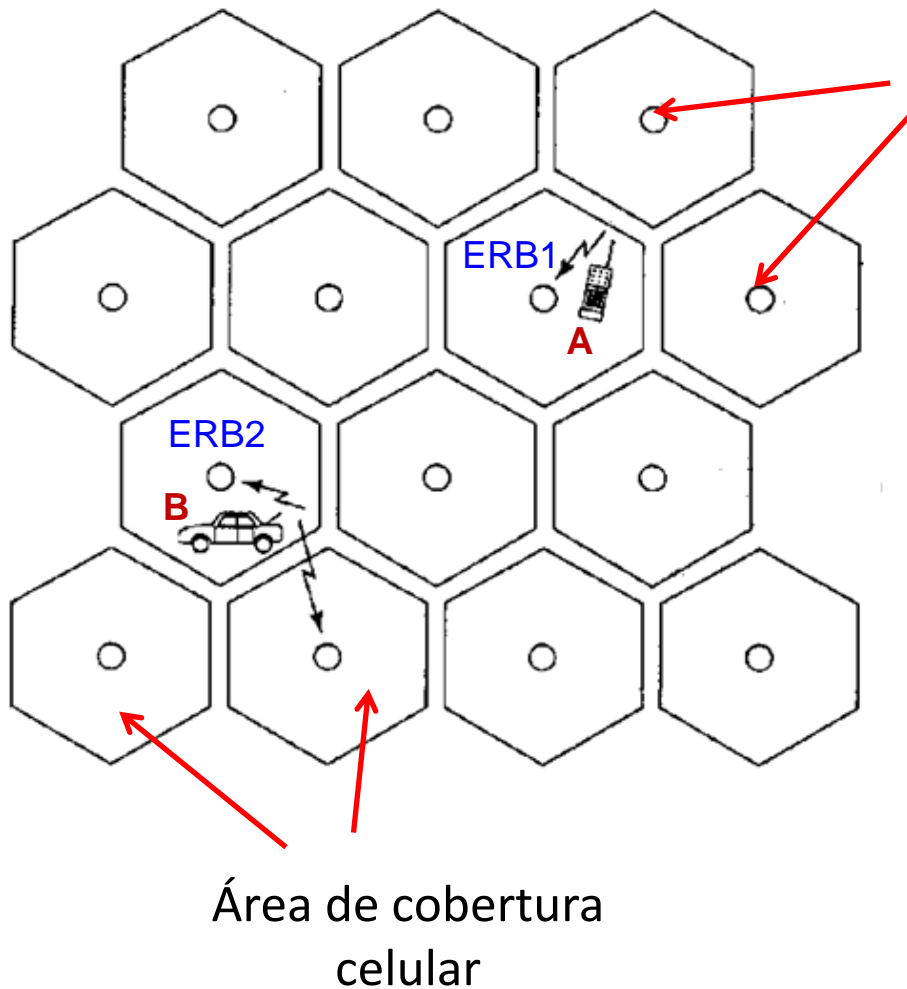
Exemplos de Frequências Licenciadas

Faixas de frequência		Aplicação
824 – 845 MHz	(uplink)	Telefonia celular GSM 900
869 – 994 MHz	(downlink)	
1.710 – 1.755 MHz	(uplink)	Telefonia celular GSM 1800
1.805 – 1.850 MHz	(downlink)	
2.500 – 2570 MHz	(uplink)	4G em operação
2620 – 2690 MHz	(downlink)	
703 – 748 MHz	(uplink)	4G a ser implantada (Atualmente usada por TV)
758 – 803 MHz	(downlink)	

Uplink: Usuário → Estação Radio Base

Downlink: Estação Rádio Base → Usuário

Sistema de Telefonia Celular



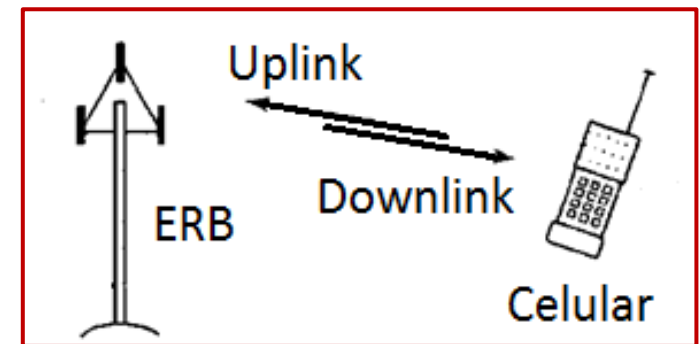
ERB

Estação Rádio Base

Ligação

Celular A → Celular B

- Celular A → ERB1
- ERB1 → → ERB2
- ERB2 → celular B



Torre de ERB de Telefonia Celular



Antenas parabólicas
Comunicação entre a ERB e a
Central de Comutação e Controle

Antenas setoriais para
comunicação entre a ERB e os
usuários móveis

Torre de ERB de Telefonia Celular

Antenas parabólicas
Comunicação entre a ERB e a
Central de Comutação e Controle

Antenas setoriais para
comunicação entre a ERB e os
usuários móveis



Exemplos de Frequências Licenciadas

Faixas de frequência	Aplicação
1.575,42 MHz (L1) 1.227,60 MHz (L2)	GPS – <i>Global Positioning System</i> - uso civil e militar
10,7 – 12,7 GHz (downlink)	Recepção direta de TV via satélite
5,9 – 6,4 GHz (uplink) 3,7 – 4,2 GHz (downlink)	Comunicação via satélite Banda C
14,0 – 14,5 GHz (uplink) 10,7 – 12,7 GHz (downlink)	Comunicação via satélite Banda Ku

Uplink: Estação terrestre → Satélite

Downlink: Satélite → Estação terrestre

Aplicações de frequências de uso livre

- **Faixas de frequência de uso livre**

- Bandas **ISM** – “**I**ndustrial, **S**cientific and **M**edical”
- Aplicações industriais, científicas e médicas
 - Fornos de micro-ondas
 - Telefone sem fio
 - Roteador sem fio
 - Radiômetro para detecção de câncer, etc.
 - Identificação por rádio frequência - RFID

Máxima potência radiada
30 dBm (1 W)

Faixas de frequências ISM

Faixas de frequência	Frequência central	Exemplos de uso
6,780 a 6,795 MHz	6,78 MHz	RF RFID ¹
13,560 a 13,567 MHz	13,56 MHz	RF RFID ¹
26,957 a 27,283 MHz	27,12 MHz	VHF RFID ¹
40,66 a 40,70 MHz	40,68 MHz	
433,05 a 434,79 MHz	433,92 MHz	Controle remoto RF ²
902 a 928 MHz	915 MHz	UHF RFID ¹

¹RFID – *Radio Frequency Identification*

² Portas de garagem, alarmes de carros e controle remoto de brinquedos

Faixas de frequências ISM

Faixas de frequência	Frequência central	Exemplos de uso
2,400 a 2,500 GHz	2,45 GHz	Forno de micro-ondas Telefone sem fio WiFi , WiMAX, ZigBee
5,725 a 5,875 GHz	5,8 GHz	Telefone sem fio WiFi, WiMAX
24,00 a 24,25 GHz	24,125 GHz	Serviço de satélite amador
61,0 a 61,5 GHz	61,25 GHz	Comunicação intersatélites
122 a 123 GHz	122,5 GHz	Pesquisa (veículos espaciais)
244 a 246 GHz	245 GHz	Radioastronomia

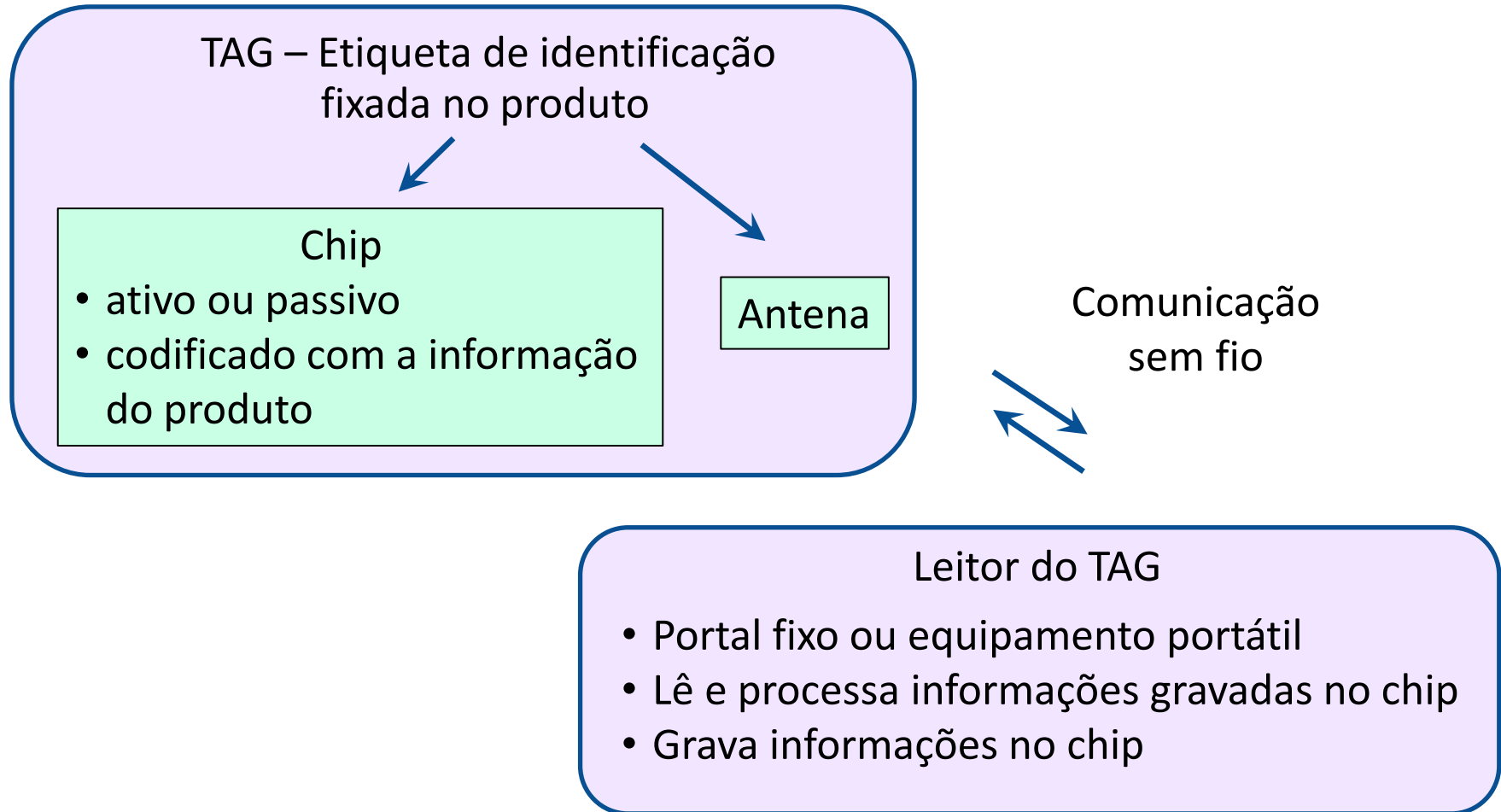
Aplicações em frequências ISM

RFID - Identificação por meio de rádio frequência

- Evitar de furto de produtos
- Controlar estoques em tempo real
- Monitorar veículos em movimento
 - Pedágio eletrônico
- Localizar itens em depósitos
 - Containers
 - Alfândega
- Identificar objetos e animais
 - Implante de chip
- Identificação de pessoas
 - Tornozelera eletrônica

Aplicações em frequências ISM

RFID - Identificação por meio de rádio frequência



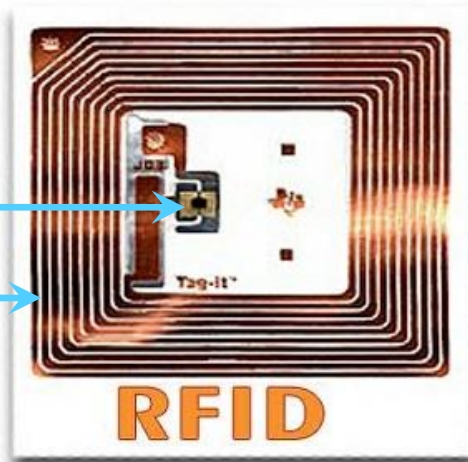
Aplicações em frequências ISM

RFID - Identificação por meio de rádio frequência

TAG de RFID

Chip

Antena



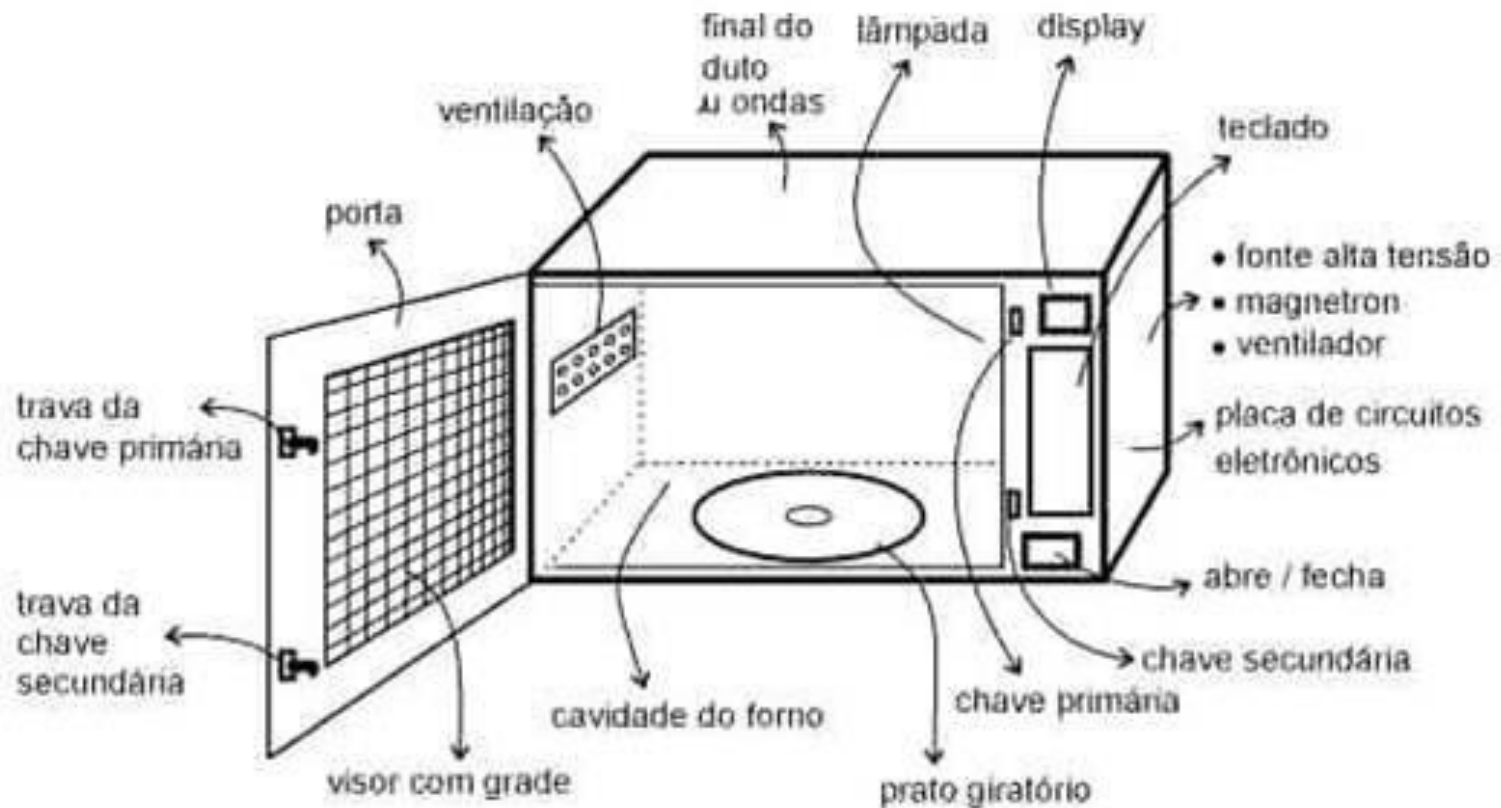
Sistema de pedágio eletrônico



TAG de pedágio eletrônico no vidro do carro

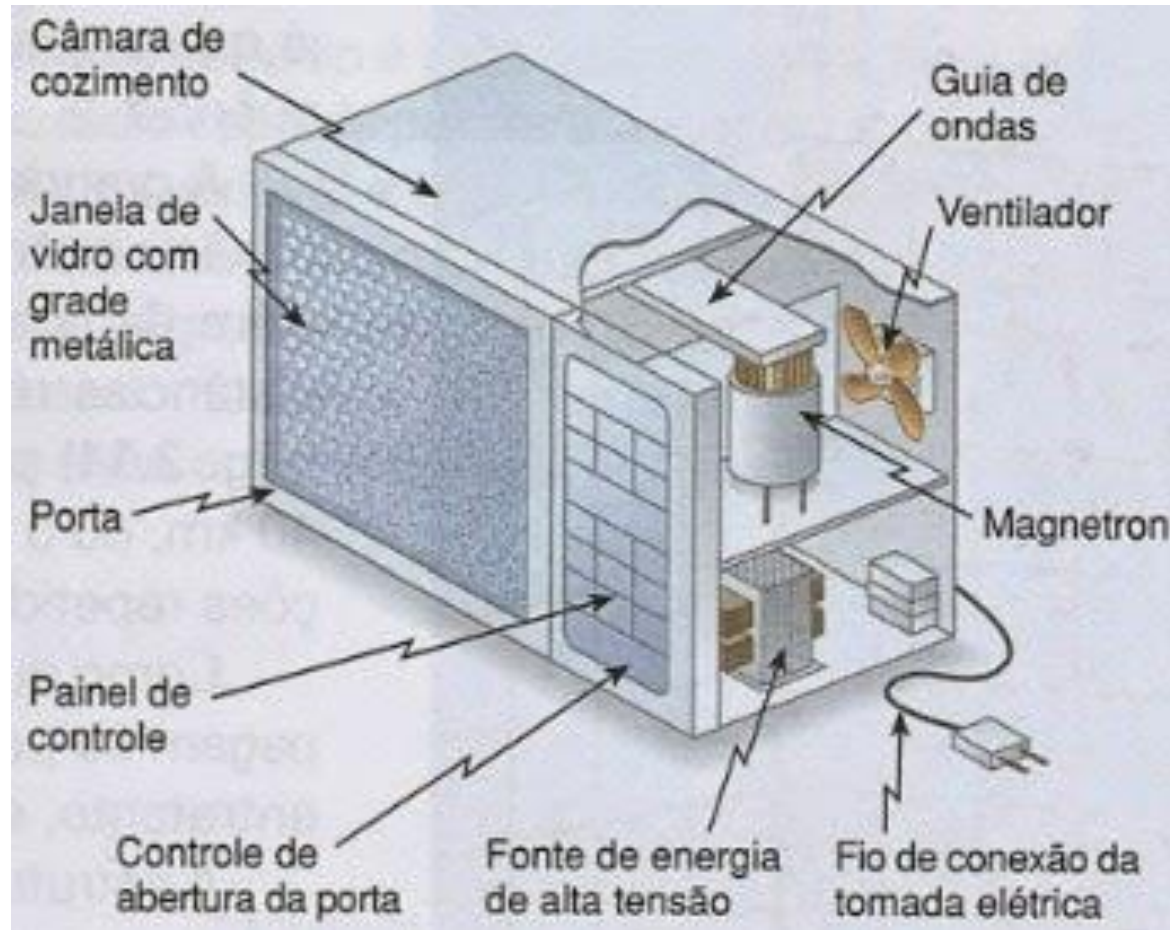
Aplicações em frequências ISM

Forno de micro-ondas



Aplicações em frequências ISM

Forno de micro-ondas



Vantagens de usar micro-ondas

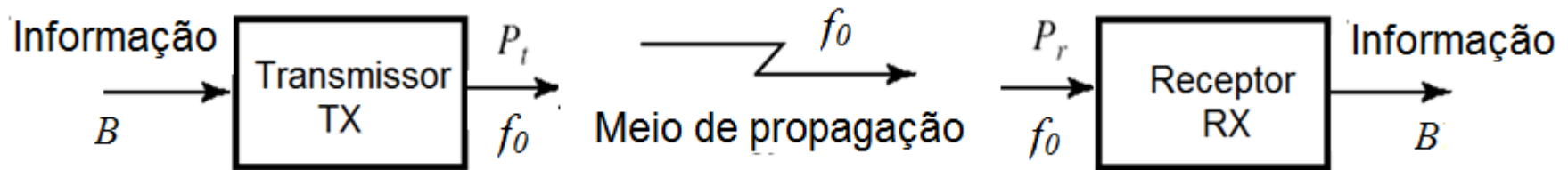
- Espectro de RF → 30 KHz até 300 MHz
 - Já está bastante ocupado
 - Novos sistemas de comunicação precisam de novas frequências
- Faixa de micro-ondas → 300 MHz a 300 GHz
 - Aproximadamente 300 GHz de banda
 - Comporta inúmeras portadoras
 - Comporta inúmeros novos serviços

Vantagens de usar micro-ondas

- Antenas de micro-ondas associam
 - Alto ganho
 - Alta diretividade
 - Dimensões razoavelmente pequenas (proporcionais à $\lambda = c/f$)
- Micro-ondas atravessam a ionosfera
 - Comunicação entre a Terra e o espaço
 - Satélites artificiais
 - Naves e sondas espaciais
 - Pesquisa sobre vida extraterrestre

Vantagens de usar micro-ondas

- Modelo de sistema de comunicação



- Informação
 - Voz, imagem ou dados
 - Banda B (Hz)
- Frequência portadora f_0
 - Modulada em amplitude, frequência ou fase pela informação
 - Usada para transmitir a informação
 - Transporta a informação entre dois pontos → “portadora”

Vantagens de usar micro-ondas

- Sistemas de comunicação usuais: banda de $\approx 10\%$
 $f_0 \rightarrow$ frequência portadora
 $BW \rightarrow$ banda de informação transmitida $\rightarrow 10\%$ de f_0
- Frequências mais altas \rightarrow maiores bandas de informação
- Exemplo – transmissão de canais de TV
 - Banda ocupada por um canal de TV $\rightarrow 6 \text{ MHz}$

Sistema operando em 600 MHz

$$f_0 = 600 \text{ MHz} \therefore BW = 60 \text{ MHz}$$

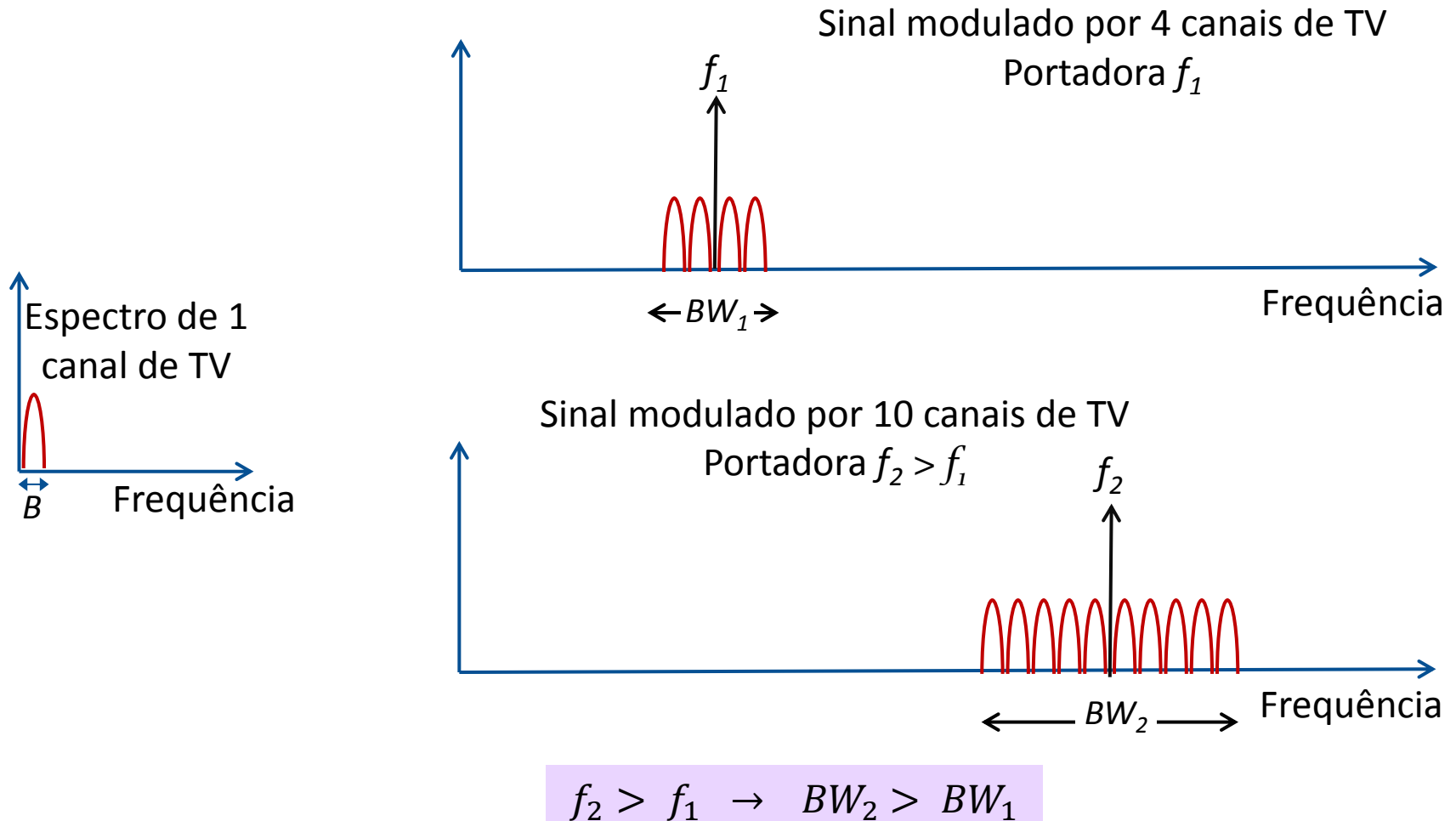
$\rightarrow 10$ canais de TV

Sistema operando em 6 GHz

$$f_0 = 6 \text{ GHz} \therefore BW = 600 \text{ MHz}$$

$\rightarrow 100$ canais de TV

Vantagens de usar micro-ondas





NÍVEIS SEGUROS DE RADIAÇÃO

Níveis Seguros de Radiação

Tipos de radiação

- Radiação IONIZANTE

- Efeitos cumulativos
- Raios X → doses altas: leucemia, tumores, etc.

- Radiação NÃO-IONIZANTE

- Efeitos não-cumulativos
- RF, micro-ondas e ondas milimétricas
- Efeitos térmicos ⇒ aquecimento de tecidos vivos
- Efeitos não-térmicos ⇒ em baixos níveis de potência $\Delta T \approx 0$
(Ex.: formação de cadeias de células no sangue)

Níveis Seguros de Radiação

- Normas internacionais
 - Limite de densidade de potência para exposição contínua segura
 - Limite de campo elétrico máximo
 - Consideram efeitos térmicos de RF e micro-ondas
 - Níveis de potência que causam aquecimento perceptível do organismo
 - Mas não consideram efeitos não térmicos

Efeitos biológicos de radiação por RF e micro-ondas é um tema cujo estudo está em andamento.

Níveis Seguros de Radiação

- Níveis seguros de radiação
 - Dependem da frequência
 - Expressos em densidade de potência
(potência)/(área) \Rightarrow mW/cm²
 - Sistemas nas faixas ISM
 $P \leq 1 \text{ W}$
 - Estação Rádio Base de telefonia celular
 $P \leq 500 \text{ W}$ em torres altas
 $P \leq 10 \text{ W}$ em áreas urbanas



Níveis Seguros de Radiação

- Norma dos Estados Unidos
- Efeitos térmicos de RF e micro-ondas – limite para exposição contínua

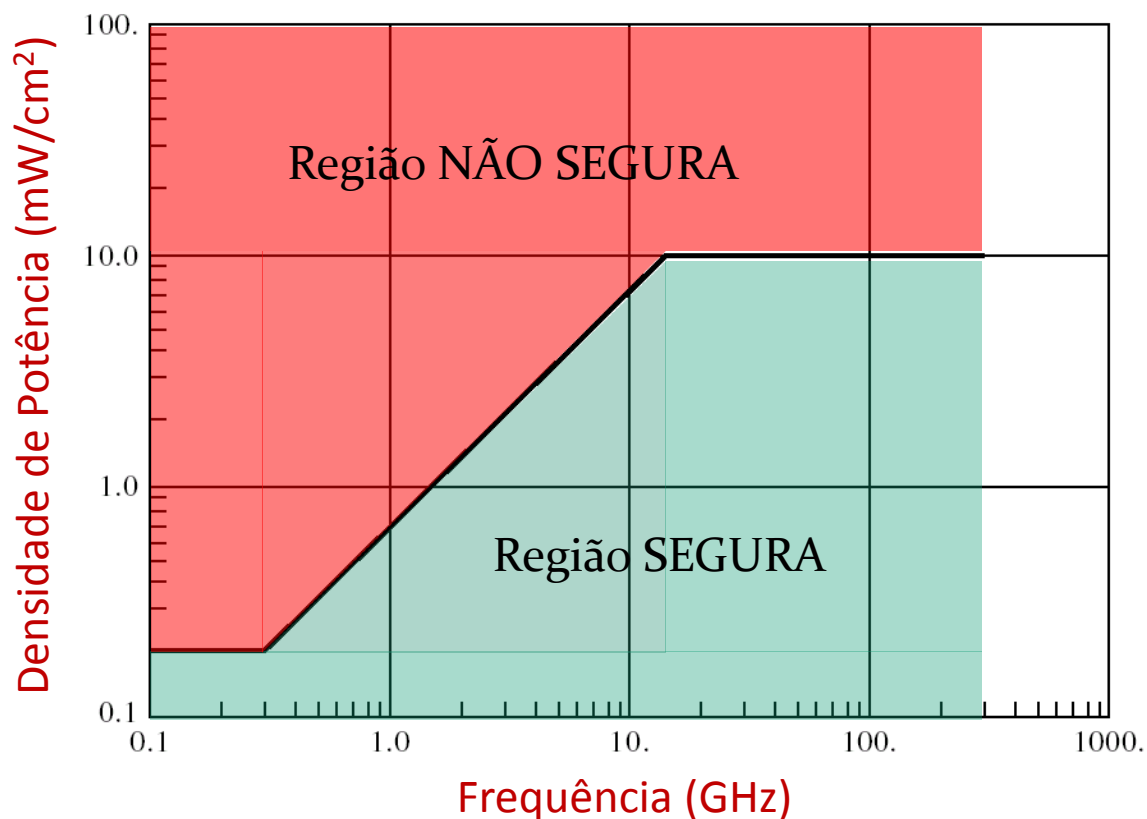
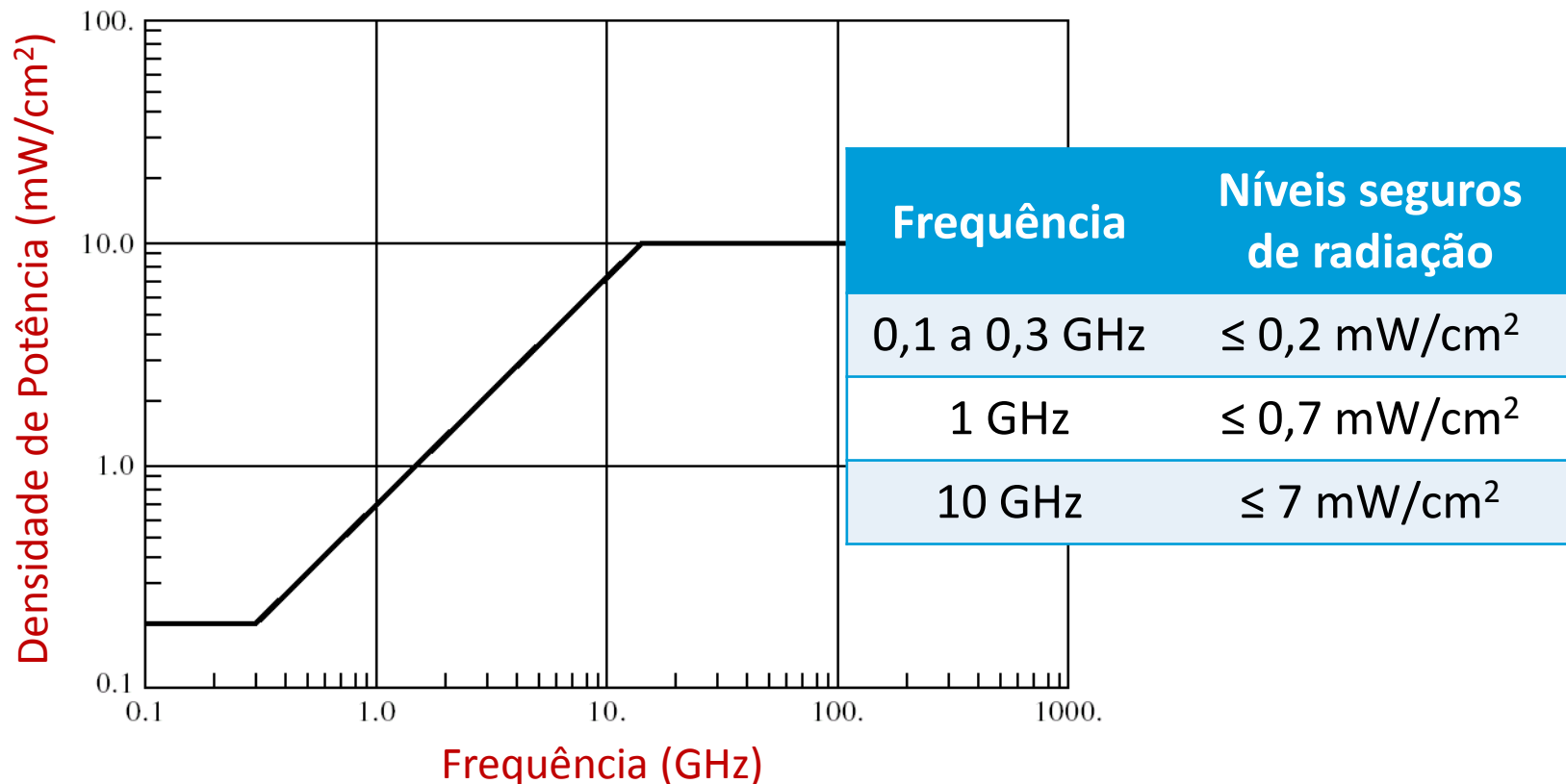


Figura 13.29, *Microwave Engineering*, David M. Pozar

Níveis Seguros de Radiação

- Norma dos Estados Unidos
- Efeitos térmicos de RF e micro-ondas – limite para exposição contínua





UNIDADES DE FREQUÊNCIA, GANHO E POTÊNCIA

Unidades

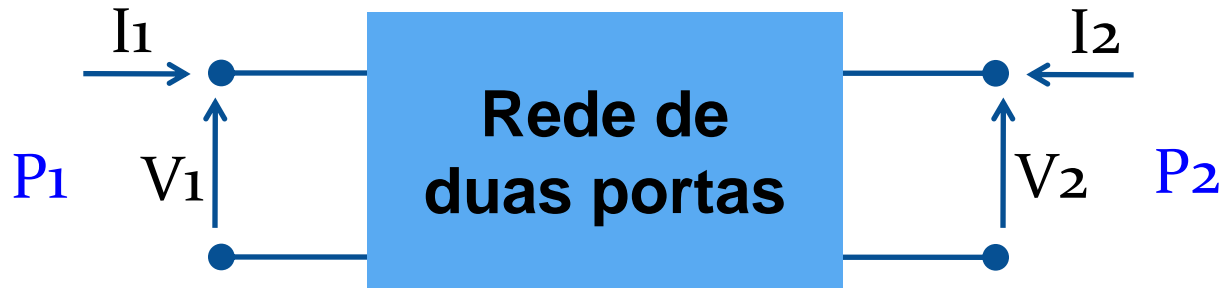
- Unidades de frequência

Unidade	Equivalência
1 Hz	1 ciclo/segundo
1 kHz	10^3 Hz
1 MHz	10^6 Hz
1 GHz	10^9 Hz
1 THz	10^{12} Hz

Unidades

- Decibéis
 - Unidade logarítmica relativa
 - Usada para expressar
 - Ganho de tensão
 - Ganho de corrente
 - Ganho de potência
 - Potência

Unidades



- Dada uma rede de duas portas

V_1 tensão de entrada

V_2 tensão de saída

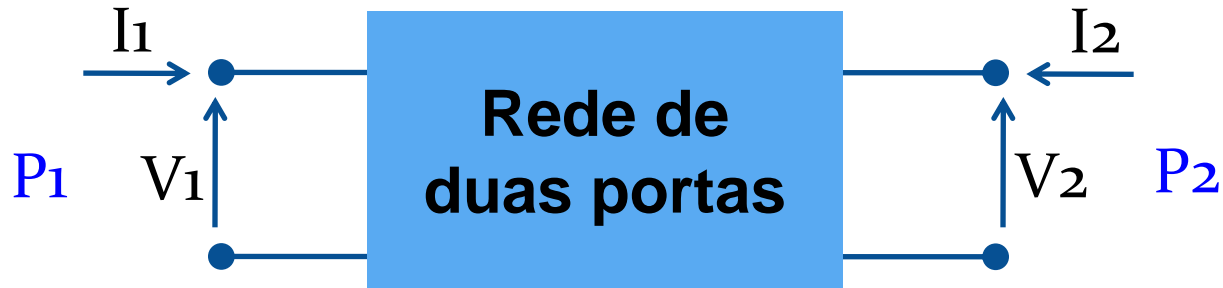
I_1 corrente de entrada

I_2 corrente de saída

P_1 potência de entrada

P_2 potência de saída

Unidades



- Ganho de potência (linear)

$$G_p(\text{linear}) = \frac{P_2}{P_1}$$

- Ganho de potência em dB

$$G_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$$

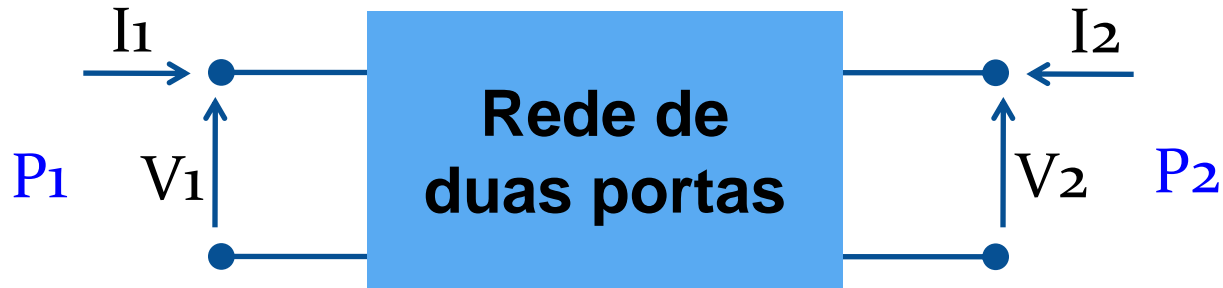
- Exemplo

$$G_p(\text{linear}) = \frac{P_2}{P_1}$$

$$G_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$$

$G_p(\text{linear})$	$G_p(\text{dB})$
1	0
2	3
4	6
10	10
20	13
40	16
100	20
200	23
400	26
1000	30

Unidades



- Redes com perdas

$$P_2 < P_1 \Rightarrow G_p(\text{linear}) < 1$$

- Ganho de potência em dB

$$G_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1} < 0$$

- Exemplo

$$G_p(\text{linear}) = \frac{P_2}{P_1}$$

$$G_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$$

$G_p(\text{linear})$	$G_p(\text{dB})$	Perda ou atenuação
0,5	-3 dB	3 dB
0,1	-10 dB	10 dB
0,05	-13 dB	13 dB
0,025	-16 dB	16 dB
0,01	-20 dB	20 dB
0,005	-23 dB	23 dB
0,0025	-26 dB	26 dB
0,001	-30 dB	30 dB

Unidades

- Potência em decibéis
 - *dBm* → potência relativa a 1 mW

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \left(\frac{P(\text{mW})}{1 \text{ mW}} \right)$$

- *dBW* → Potência relativa a 1 W

$$P(\text{dBW}) = 10 \log \left(\frac{P(\text{W})}{1 \text{ W}} \right)$$

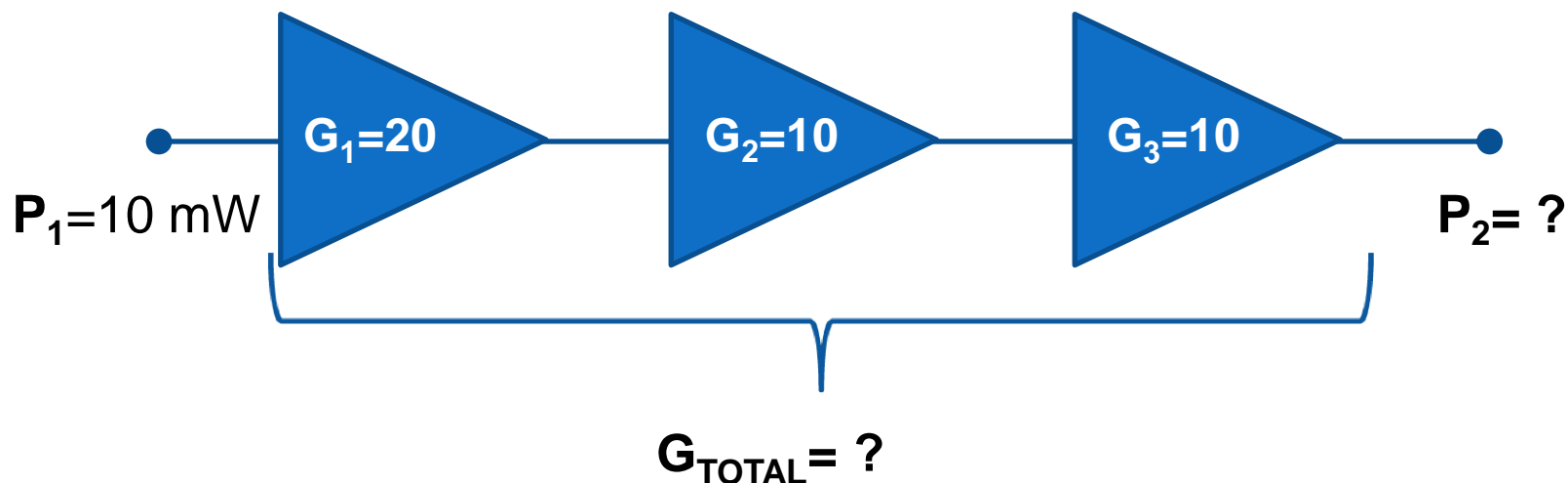
- Exemplo

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \left(\frac{P(\text{mW})}{1 \text{ mW}} \right)$$

$$P(\text{dBW}) = 10 \log \left(\frac{P(\text{W})}{1 \text{ W}} \right)$$

P(mW)	P(dBm)
1	0
2	3
10	10
100	20
1.000	30
P(W)	P(dBW)
1	0
2	3
10	10
100	20
1.000	30

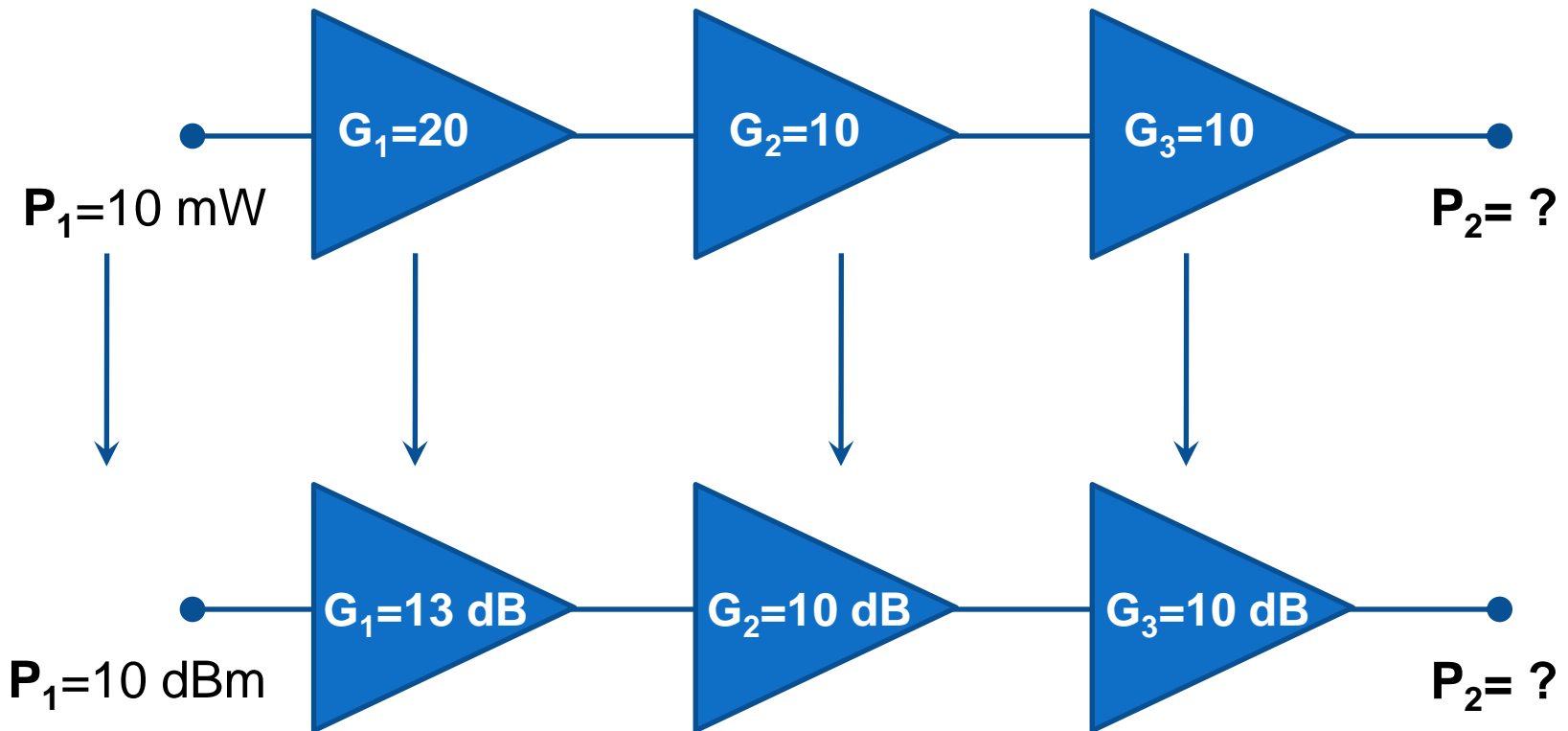
- Cálculos lineares de ganho e potência



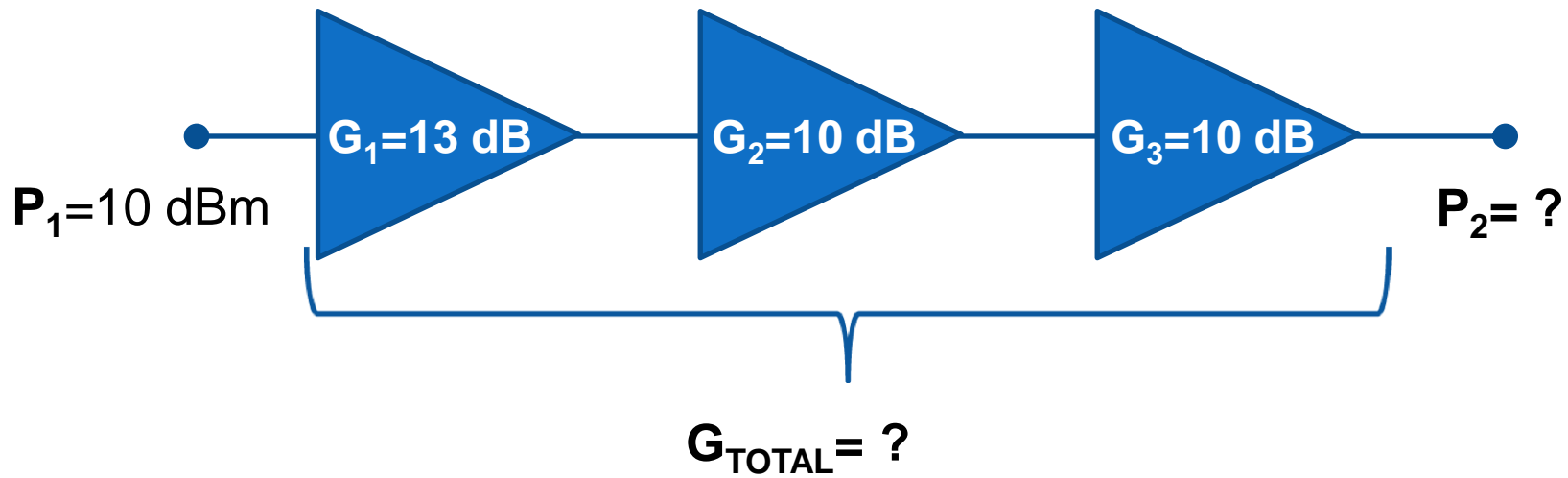
$$G_{\text{TOTAL}}(\text{linear}) = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 2.000$$

$$P_2(\text{mW}) = G_{\text{TOTAL}}(\text{linear}) \cdot P_1(\text{mW}) = 20.000 \text{ mW}$$

- Cálculos em decibéis de ganho e potência



- Cálculos em decibéis de ganho e potência



$$G_{TOTAL}(dB) = G_1 + G_2 + G_3 = 33 \text{ dB}$$

$$P_2(dBm) = G_{TOTAL}(dB) + P_1(dBm) = 43 \text{ dBm}$$