

SISTEMAS DE MICRO-ONDAS

Introdução e aplicações

PSI3481

SISTEMAS ÓPTICOS E DE MICRO-ONDAS

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra

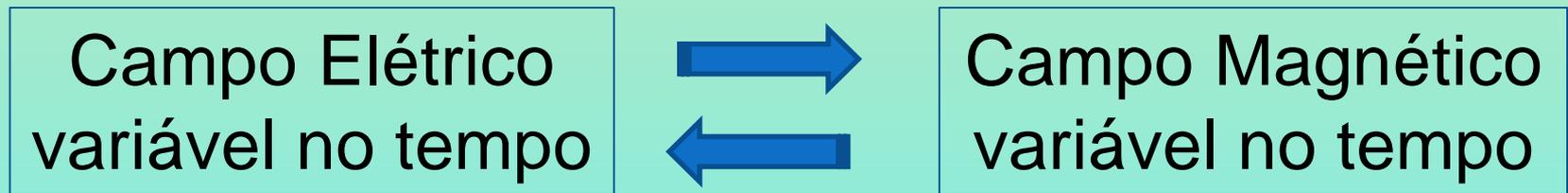
Sumário

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

ASPECTOS HISTÓRICOS

Aspectos Históricos

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



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

Aspectos Históricos

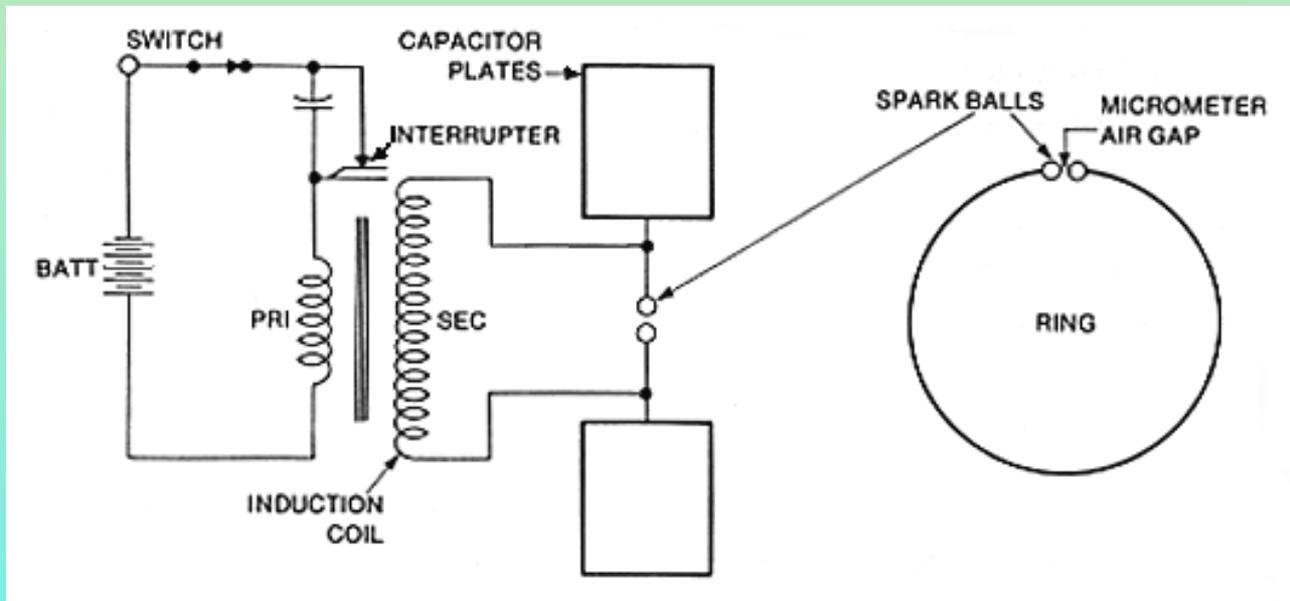
- Heinrich Rudolph Hertz
 - Experiências entre 1873 e 1891
 - Demonstração experimental da existência de ondas eletromagnéticas
 - Experimento

Gerador de faísca \Leftrightarrow Anel metálico com fenda

- Detecta a faísca à distância!
 - Onda EM se propagou 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”



Aspectos Históricos

- Guglielmo Marconi
 - Desenvolveu a transmissão de ondas EM à distância e aplicações
 - 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...

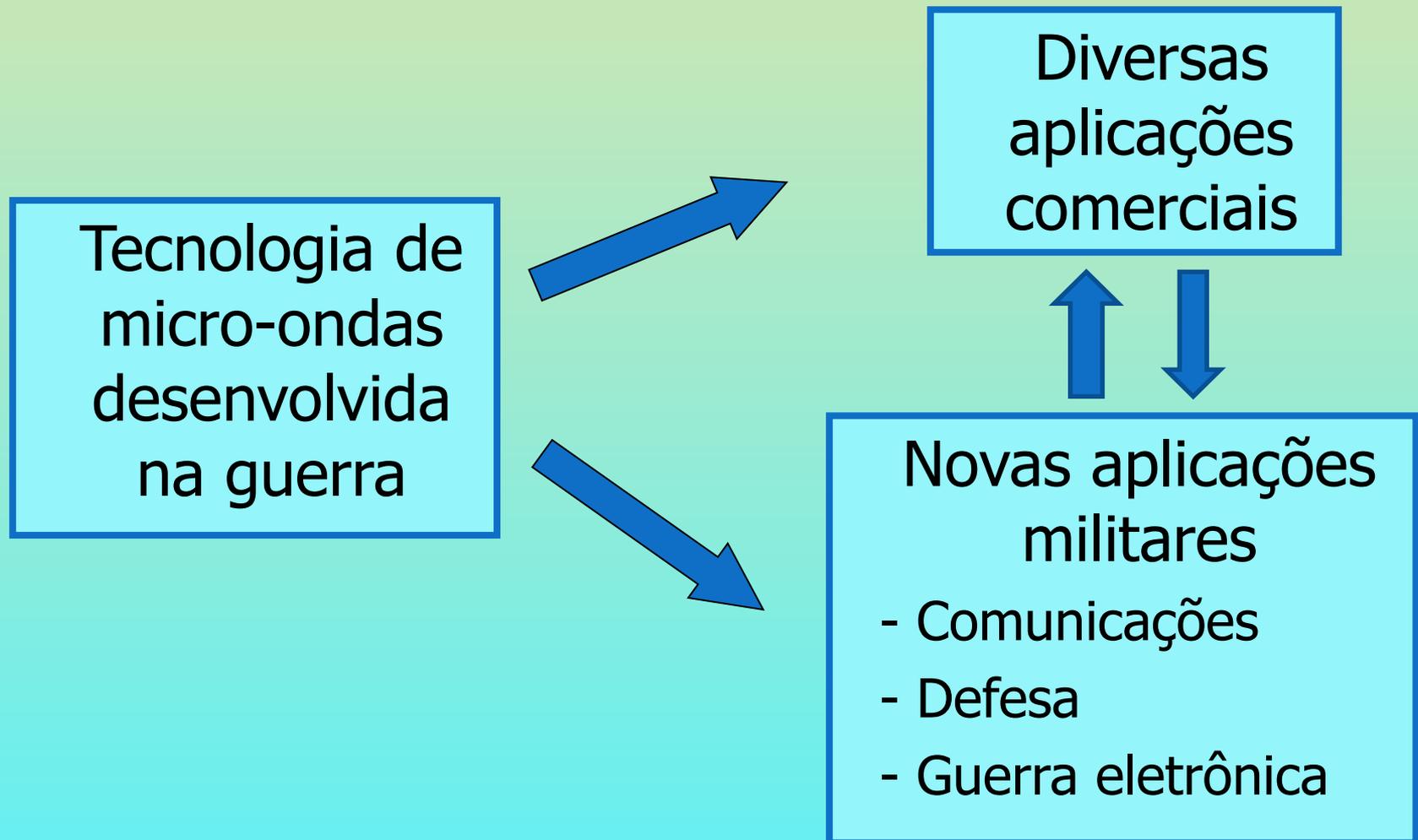
- Rádio e TV
 - Impacto social \Rightarrow informação rápida e para todos
- RADAR operando em micro-ondas
 - Objetivo: detectar aviões e navios
 - Válvula Klystron
 - geração e amplificação em micro-ondas
 - Guias de ondas
 - condução de micro-ondas com baixas perdas

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

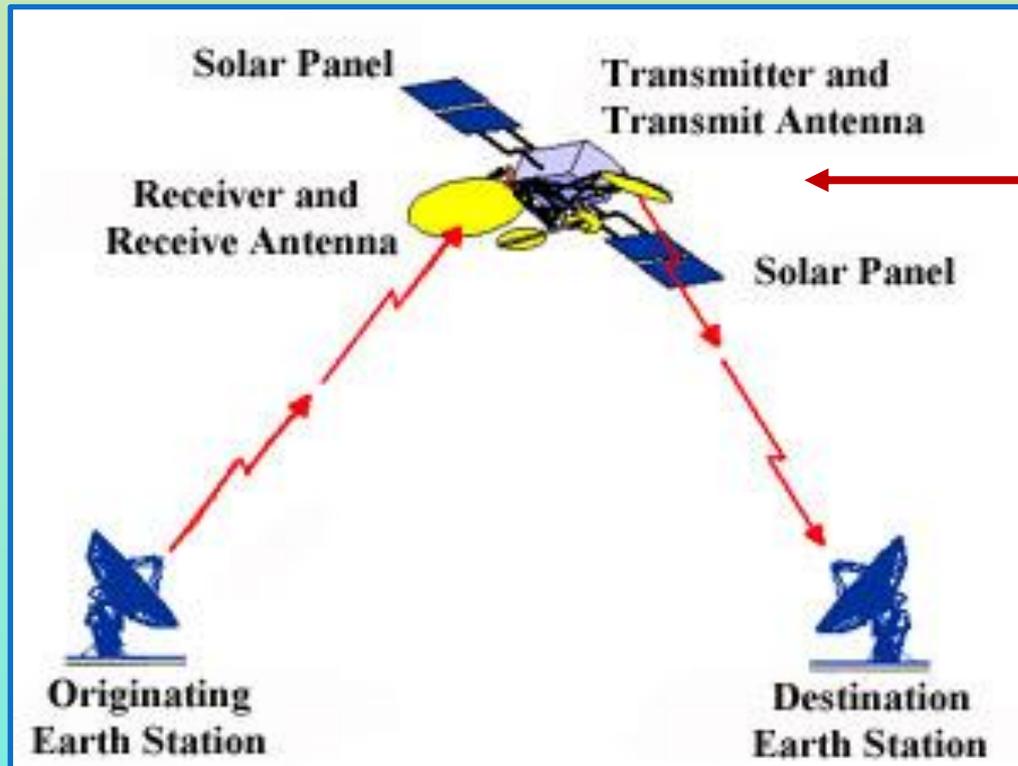
Sistemas de Satélites Artificiais

- 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

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

- receptor
- transmissor
- antenas
- painéis solares

Comunicação
intercontinental

Satélites
geoestacionários

$H \cong 36.000 \text{ km}$

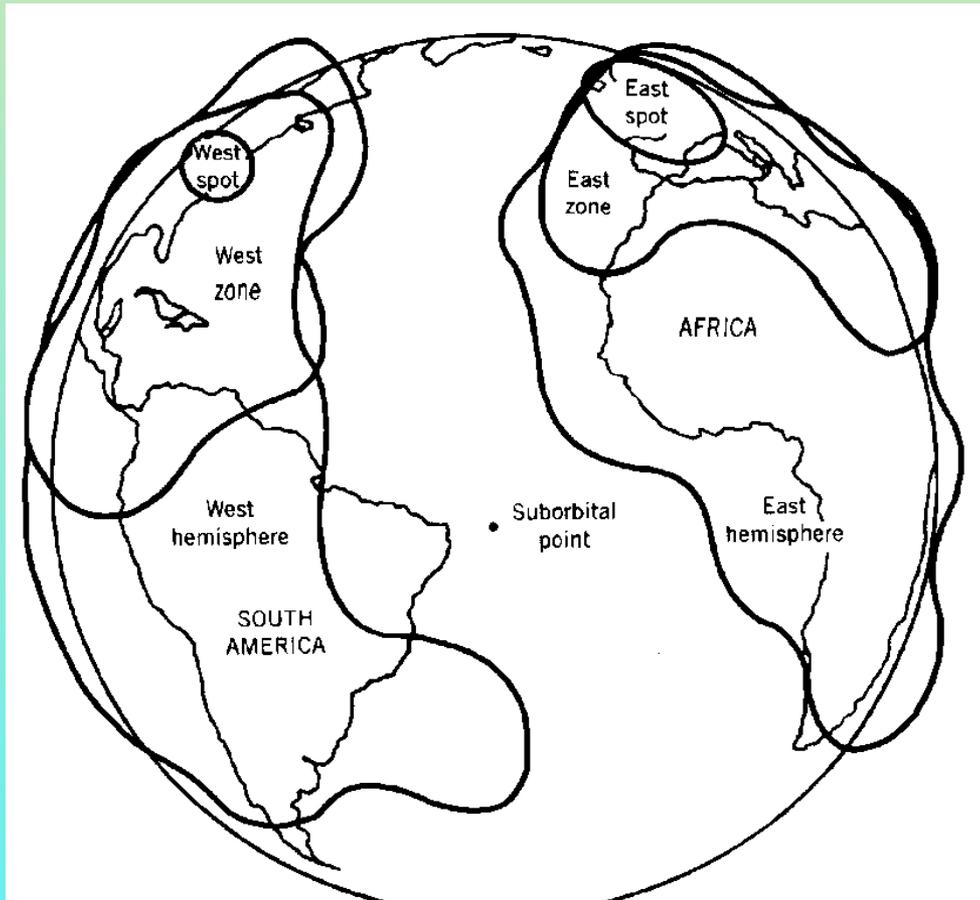
Estações terrestres

- receptor e transmissor e antenas

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 utilizam
 - 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

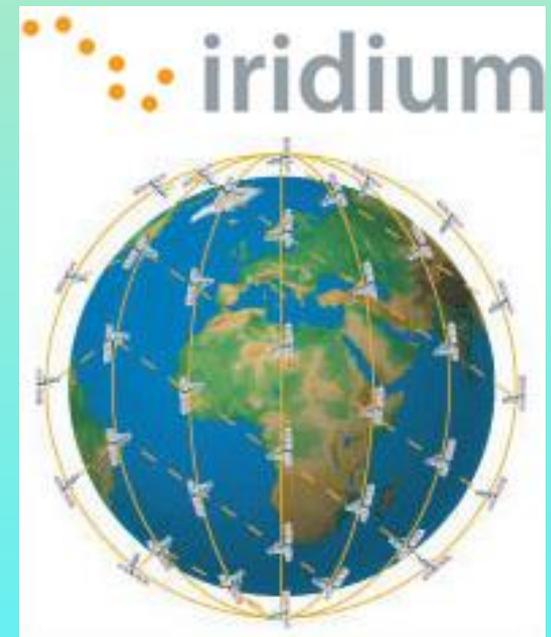
- Sistemas com satélites artificiais **MEO**
 - MEO – **Medium Earth Orbit**
 - Órbita intermediária entre GEO e LEO
 - Movem-se em relação ao solo
 - Exemplo – **GPS – Global Positioning System**
 - Órbita de 20.200 km
 - Período orbital de 12 horas
 - 24 satélites ativos e 3 de reserva
 - Usuário precisa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

Sistemas de Satélites Artificiais

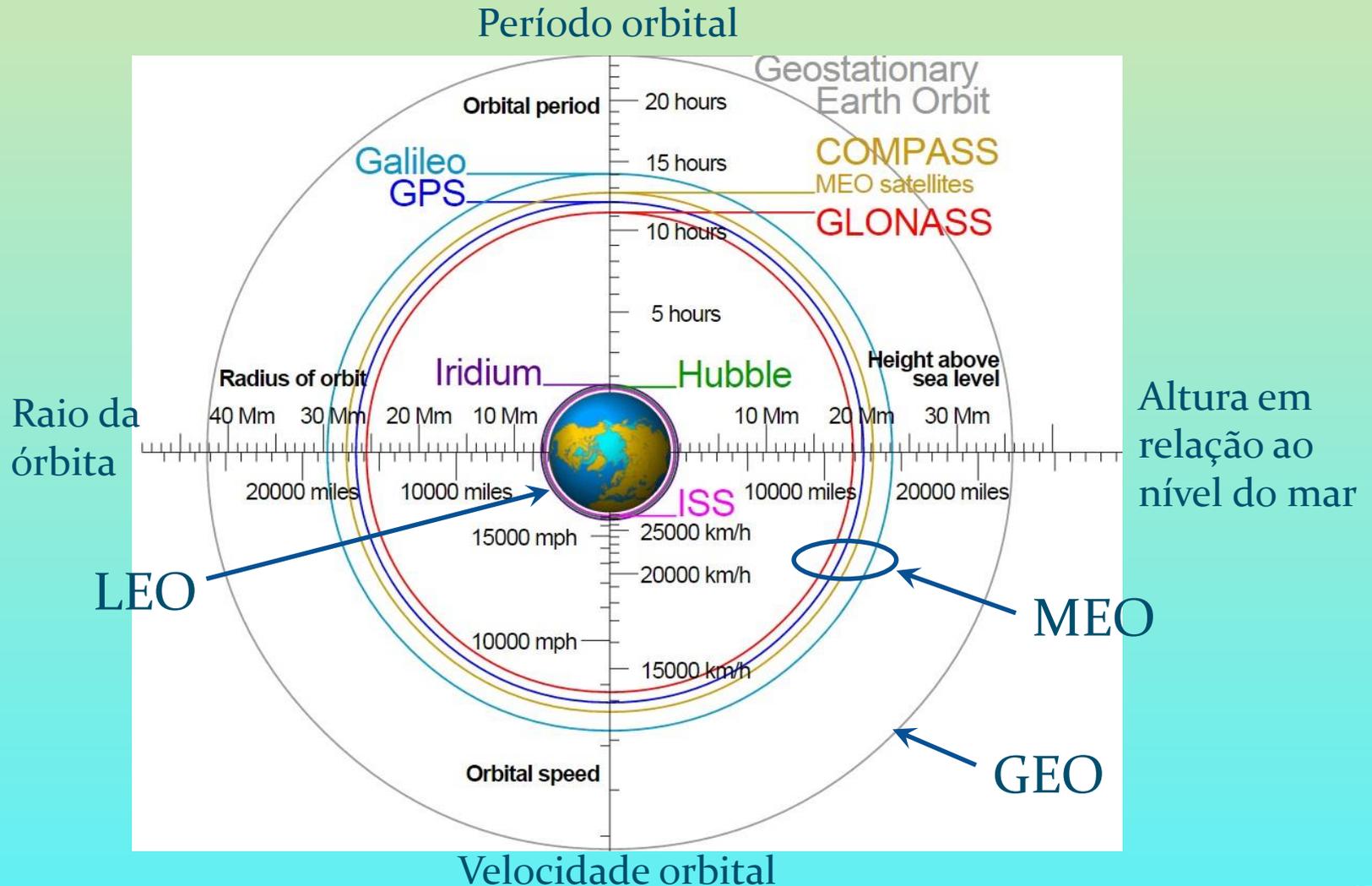
- Sistemas com satélites artificiais **LEO**
 - LEO – **Low Earth Orbit**
 - Órbitas de 500 a 2.000 km, em geral
 - Período orbital bem menor que o da Terra
→ por exemplo, 1h30min
 - Movem-se em relação ao solo
 - Ficam “visíveis” ao usuário por tempo determinado
 - Sistemas precisam de vários satélites

Sistemas de Satélites Artificiais

- Exemplos de sistemas LEO
 - Telefone direto por satélite
 - Satélites de observação da Terra
 - Satélites espiões
 - 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



- Órbitas de navegação de satélites artificiais ao redor da Terra



Sistemas de Entretenimento

- Radiodifusão
 - Rádio AM
 - Rádio FM
- TV analógica → em extinção
- TV digital
- DBS
 - *Direct Broadcasting System*
 - Recepção de TV via satélite
 - Frequências de micro-ondas

Sistemas Terrestres sem Fio

- Telefone celular
- PCS – Personal Communication System
 - Telefone celular
 - Internet
 - GPS + ...
- WLAN – Wireless Local Area Network
 - Redes locais de computadores

Sistemas de Comunicação sem Fio

- **RFID** – *Radio Frequency Identification*
 - Etiquetas RFID em produtos para evitar roubos em lojas
 - Etiquetas RFID em *containers* – facilidade de localização
 - Identificação de automóveis – sistemas de pedágio eletrônico
- **Bluetooth e WiFi**
- **Sistemas vestíveis**
 - Smart watch

Aplicações Domésticas de Micro-ondas



- Telefone sem fio
 - Home-theater sem fio



- Roteador sem fio
 - Forno de micro-ondas



- Fone de ouvido sem fio



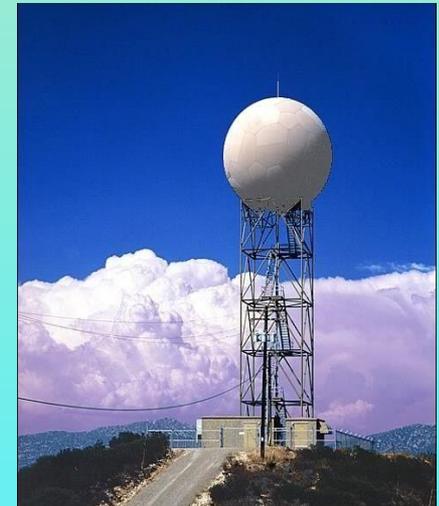
Radares

- **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

$$t = t_1$$

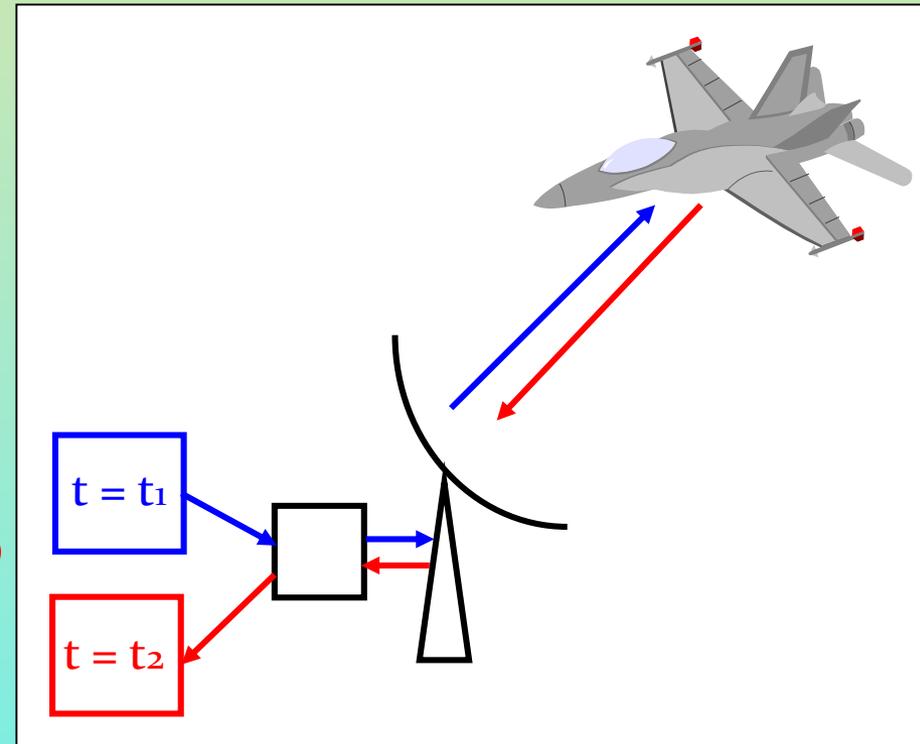
• Se houver um alvo nessa direção

- 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

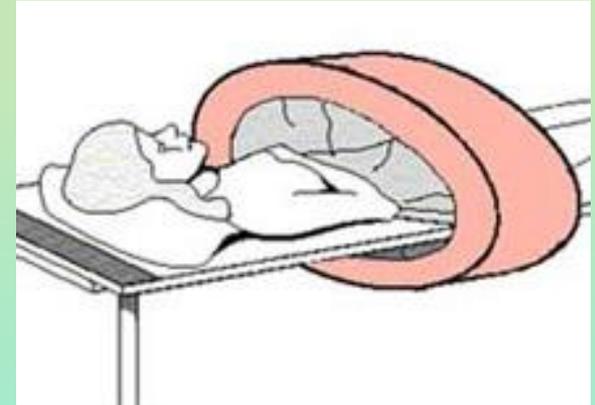
$$d = c \cdot (t_2 - t_1)/2 = \Delta t/2$$

c: velocidade da luz no vácuo

Aplicações Médicas e Industriais e Astronomia

- **Medicina**

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



- **Aplicações industriais**

- Aquecimento por micro-ondas
- Secagem de grãos

- **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

Espectro Eletromagnético

- Conjunto de frequências que constituem a energia eletromagnética
- Energia eletromagnética
 - gerada por cargas elétricas em movimento
- Frequências usadas em comunicação
 - ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível

Espectro Eletromagnético

Faixa de frequência	Comprimento de onda*	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

* $\lambda=c/f$, $c=3.10^8$ m/s, velocidade da luz no vácuo

Espectro Eletromagnético

Faixa de frequência	Comprimento de onda*	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

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

Bandas de Micro-ondas

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

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

Vantagens de Usar Micro-ondas

Espectro de RF até 300 MHz

- Já está bastante ocupado
- Novos sistemas de comunicação precisam de novas frequências

Faixa de micro-ondas

- Aproximadamente 300 GHz de banda
- Comporta inúmeras portadoras
- Comporta inúmeros novos serviços

Vantagens de 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 Micro-ondas

Maior capacidade de transmitir informação

f_0 – frequência da portadora

$BW \approx 10\%$ de f_0 banda de informação

1 canal de TV \Rightarrow 6 MHz

$f_0 = 600$ MHz \Rightarrow BW = 60 MHz

\Rightarrow 10 canais de TV

$f_0 = 6$ GHz \Rightarrow BW = 600 MHz

\Rightarrow 100 canais de TV

Agências Regulamentadoras

- **Objetivo**

- Minimizar a interferência EM entre sistemas

- **Regulamentação do espectro EM**

- Para cada sistema de comunicação sem fio, definem
 - Faixa de frequência de operação
 - Máxima potência radiada

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

Regulamentação do Espectro EM

- **Faixas de frequência licenciadas**
 - Serviços profissionais de comunicação
 - Radiodifusão – TV e rádio
 - Comunicação via satélite
 - Sistemas de posicionamento global - GPS
 - Telefonia celular, etc..
 - Máxima potência radiada: depende da aplicação

Exemplos de Frequências Licenciadas

Faixas de frequência	Aplicação
54 a 88 MHz	Canais 2 a 6 de TV – VHF*
89 a 173 MHz	Estações de Rádio FM
174 a 216 MHz	Canais 7 a 13 de TV – VHF*
470 a 608 MHz	Canais 14 a 36 de TV – UHF*
608 a 614 MHz	Radioastronomia
614 a 746 MHz	Canais 38 a 59 de TV – UHF*

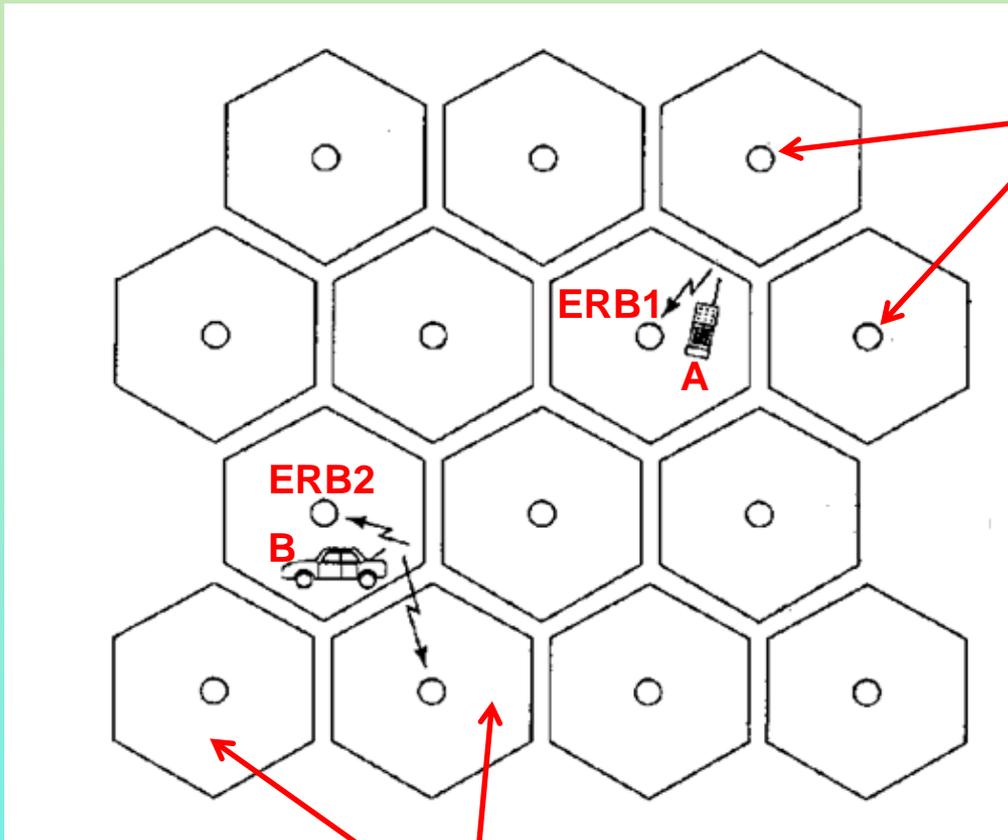
*BW = 6 MHz

Sistema de Telefonia Celular



ERB

Estação Rádio Base

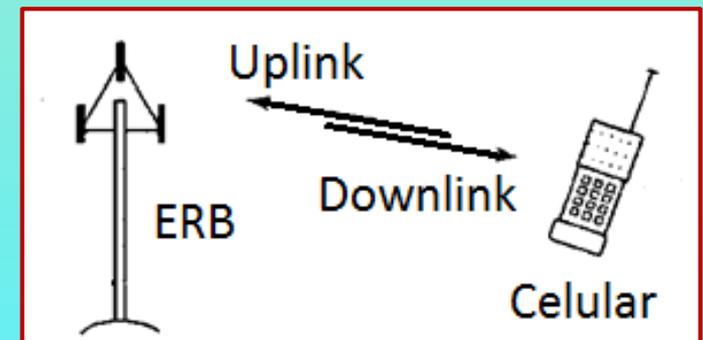


Área de cobertura
celular

Ligação

Celular A → Celular B

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



Exemplos de Frequências Licenciadas

Faixas de frequência	Aplicação
824 – 845 MHz (uplink) 869 – 994 MHz (downlink)	Telefonia celular GSM 900
1.710 – 1.755 MHz (uplink) 1.805 – 1.850 MHz (downlink)	Telefonia celular GSM 1800
2.500 – 2570 MHz (uplink) 2620 – 2690 MHz (downlink)	4G em operação
703 – 748 MHz (uplink) 758 – 803 MHz (downlink)	4G a ser implantada (Usada por TV até março de 2017)

Exemplos de Frequências Licenciadas

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

Regulamentação do Espectro EM

- **Faixas de frequência de uso livre**
 - Bandas **ISM** – “**I**ndustrial, **S**cientific and **M**edical”
 - Aplicações industriais, científicas e médicas
 - Forno de micro-ondas
 - Telefone sem fio
 - Roteador sem fio
 - Radiômetro para detecção de câncer, etc.
 - WiFi
 - Bluetooth
 - ZigBee
 - **Máxima potência radiada: 1 W**

Frequências ISM - ITU

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

Frequências ISM - ITU

Faixas de frequência	Frequência central	Exemplos de uso
2,400 a 2,500 GHz	2,45 GHz	Forno de micro-ondas Telefone sem fio, Bluetooth, 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	
61,0 a 61,5 GHz	61,25 GHz	
122 a 123 GHz	122,5 GHz	
244 a 246 GHz	245 GHz	

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
 - Consideram efeitos térmicos de RF e micro-ondas
 - Níveis de potência que causam aquecimento perceptível do organismo
 - Normas: limite de densidade de potência para exposição contínua segura

Níveis Seguros de Radiação

- Níveis seguros de radiação
 - Dependem da frequência
 - Expressos em densidade de potência

$$(\text{potência})/(\text{área}) \Rightarrow \text{mW/cm}^2$$

- 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

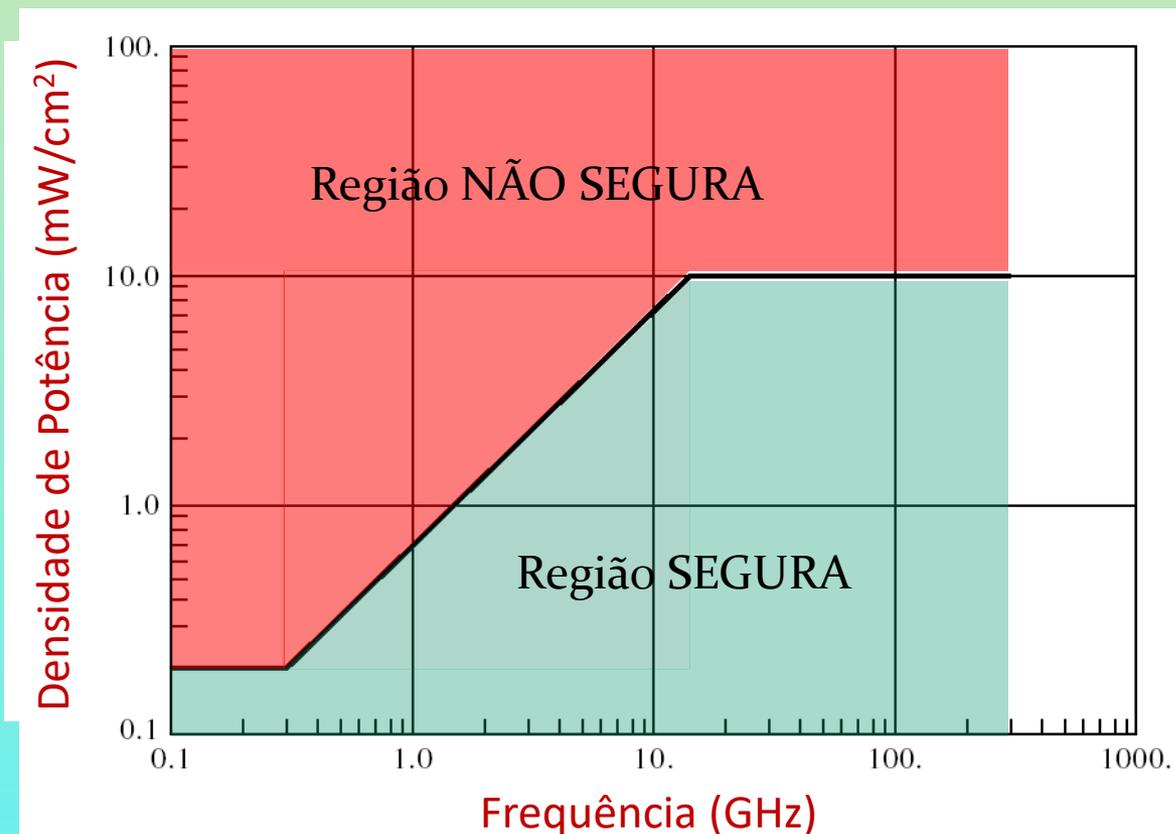
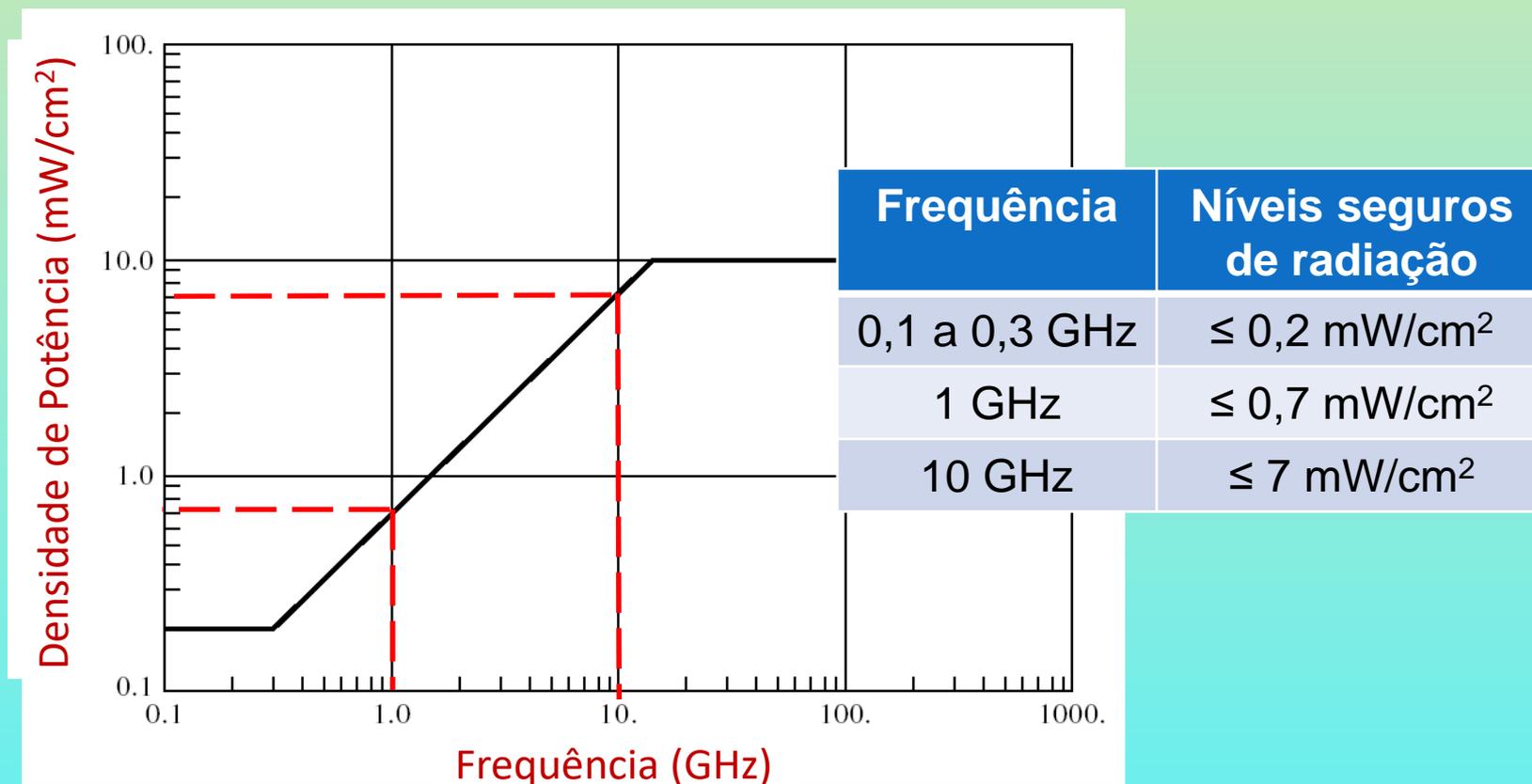


Figura 13.29, *Microwave Engineering*, David M. Pozar

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

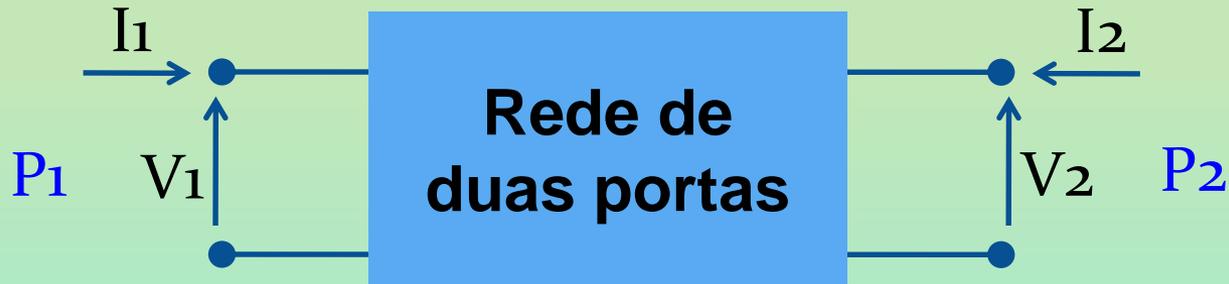
- Unidades de frequência

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

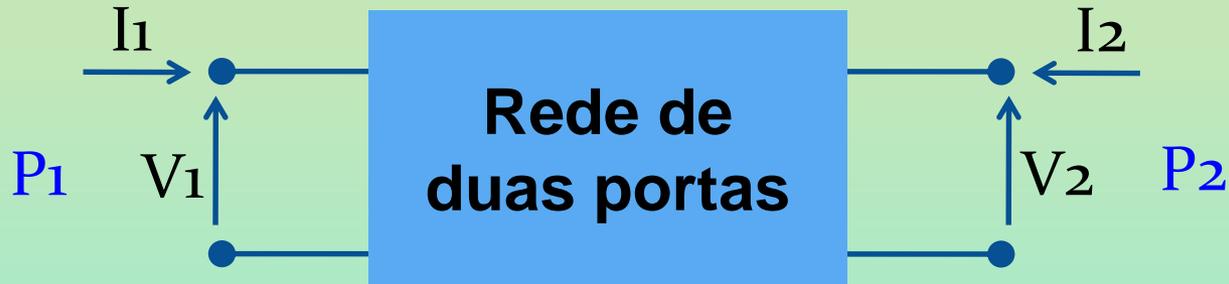
I_1 corrente de entrada

I_2 corrente de saída

P_1 potência de entrada

P_2 potência de saída

Unidades



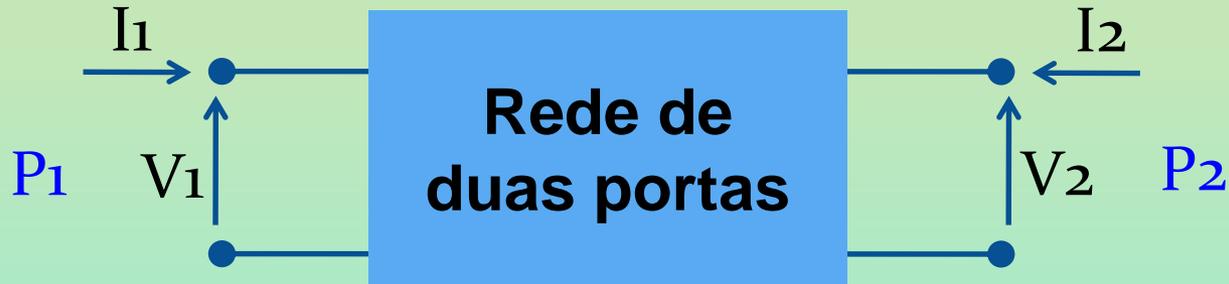
- Ganho de potência linear

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

- Ganho de potência em dB

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

Unidades



- Ganho de tensão linear

$$G_V(\text{linear}) = \frac{V_2}{V_1}$$

- Ganho de tensão em dB

$$G_V(\text{dB}) = 20 \cdot \log \frac{V_2}{V_1}$$

Unidades



- Ganho de corrente linear

$$G_I(\text{linear}) = \frac{I_2}{I_1}$$

- Ganho de corrente em dB

$$G_I(\text{dB}) = 20 \cdot \log \frac{I_2}{I_1}$$

- 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

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

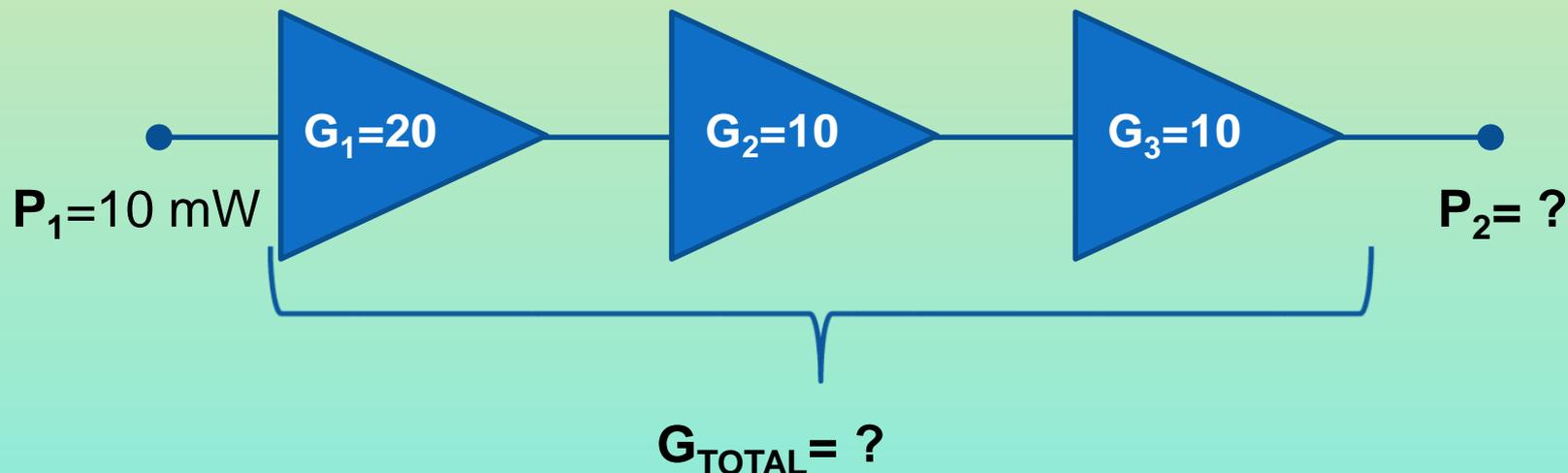
- Exemplo

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

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

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

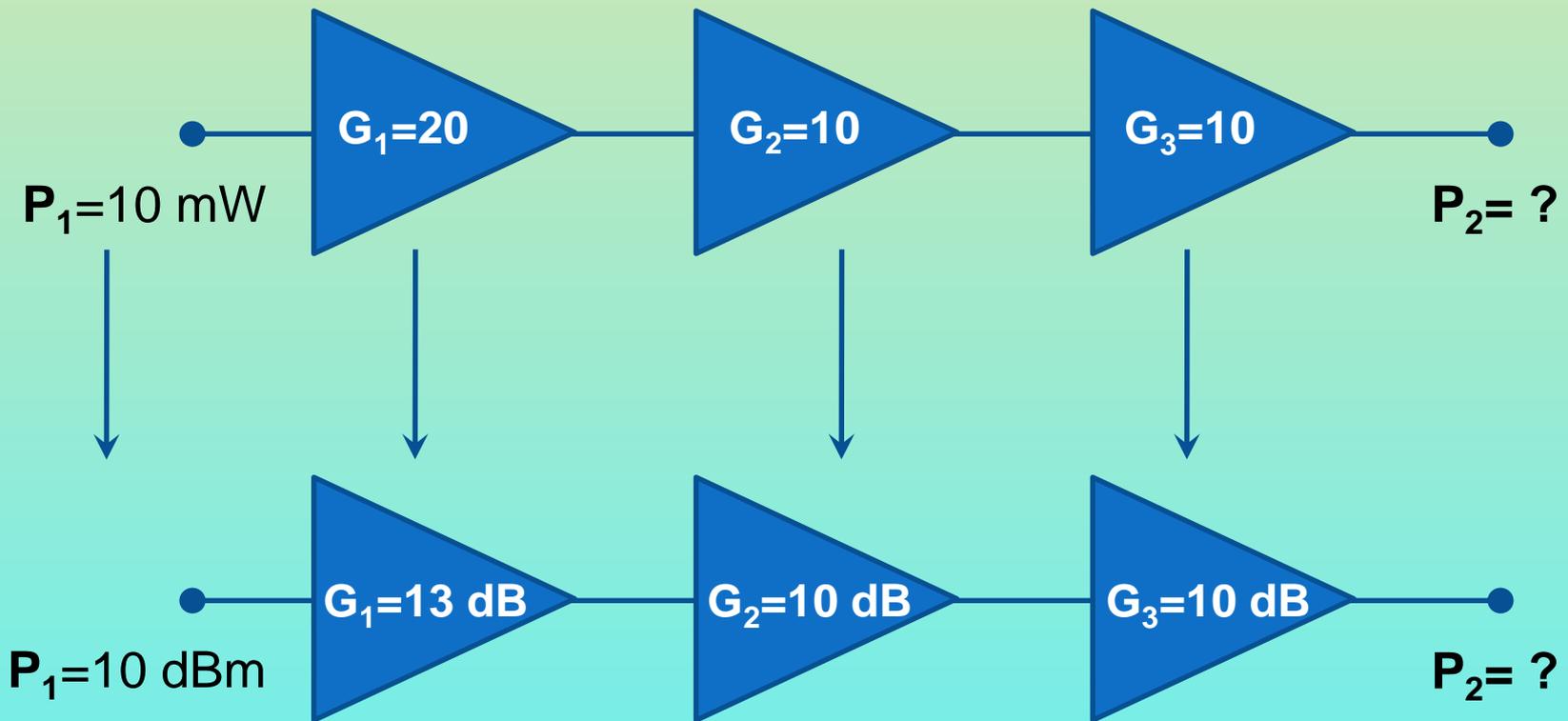
- Cálculos lineares de ganho e potência



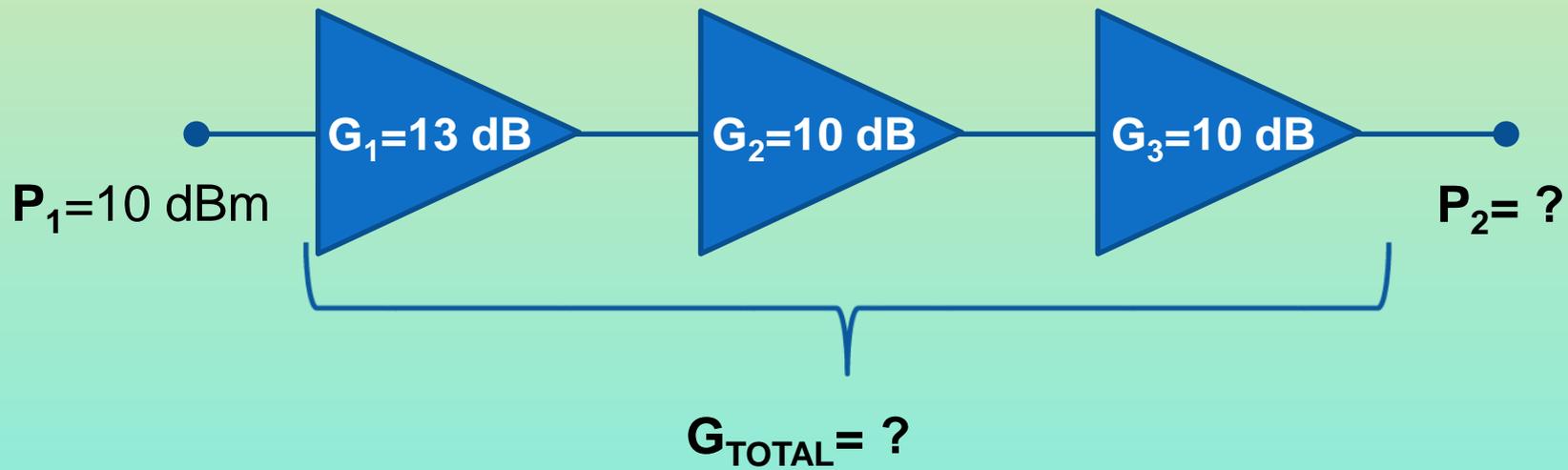
$$G_{TOTAL}(linear) = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 2.000$$

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

- Cálculos em decibéis de ganho e potência



- Cálculos em decibéis de ganho e potência



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

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