

# PSI3481 SISTEMAS ÓPTICOS E DE MICRO-ONDAS

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

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> 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
- Ondas eletromagnéticas
  - Previstas pelas equações de Maxwell
  - Compostas por campo elétrico e magnético associados
  - Propagam-se em ondas no vácuo e em meios materiais
- 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

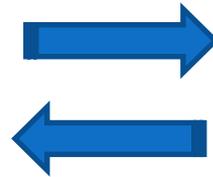
# Aspectos Históricos

James Clerk Maxwell – 1864

- Equações dos campos elétrico e magnético

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \qquad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Campo Elétrico  
variável no tempo



Campo Magnético  
variável no tempo

- Equações de Maxwell previram
  - Existência de ondas eletromagnéticas
  - Que se propagam no espaço

# Aspectos Históricos

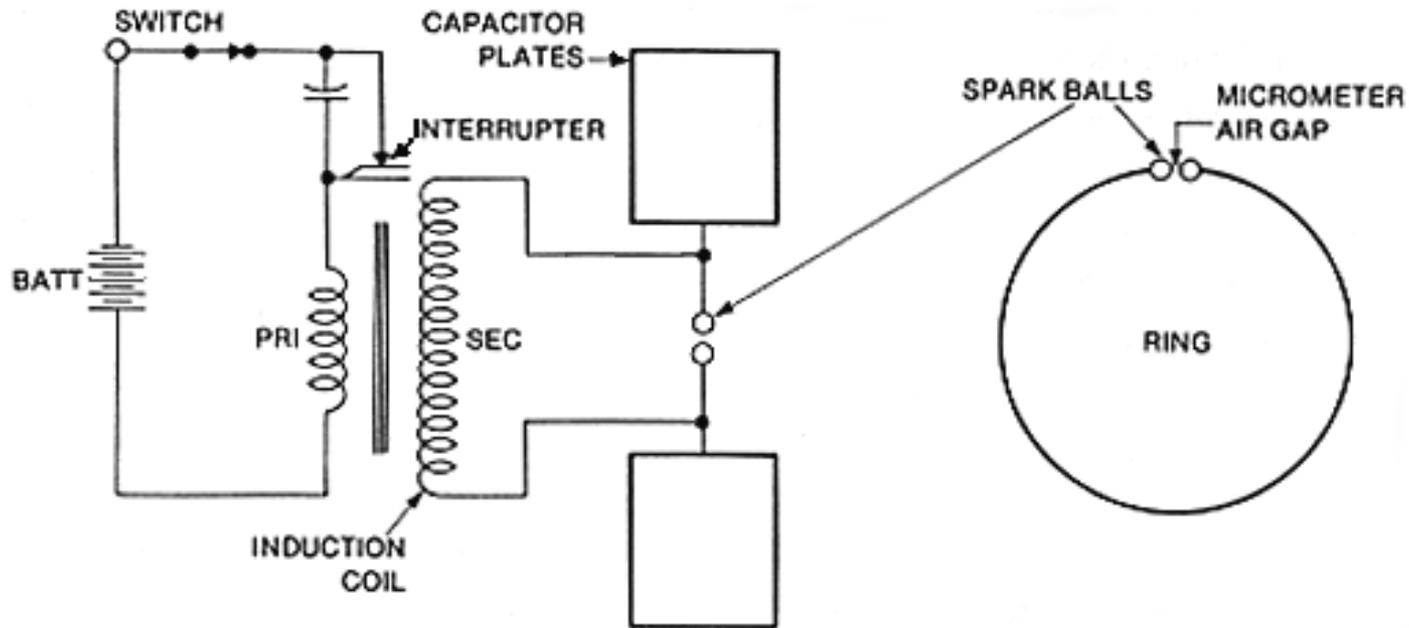
- **Heinrich Rudolph Hertz**
  - Experiências entre 1873 e 1891
  - Demonstração experimental da existência de ondas eletromagnéticas
  - Experimento

Gerador de faísca  $\Leftrightarrow$  Anel metálico com fenda

- Detecção da faísca à distância!
- Onda EM propagou-se pelo ar!

# Aspectos Históricos

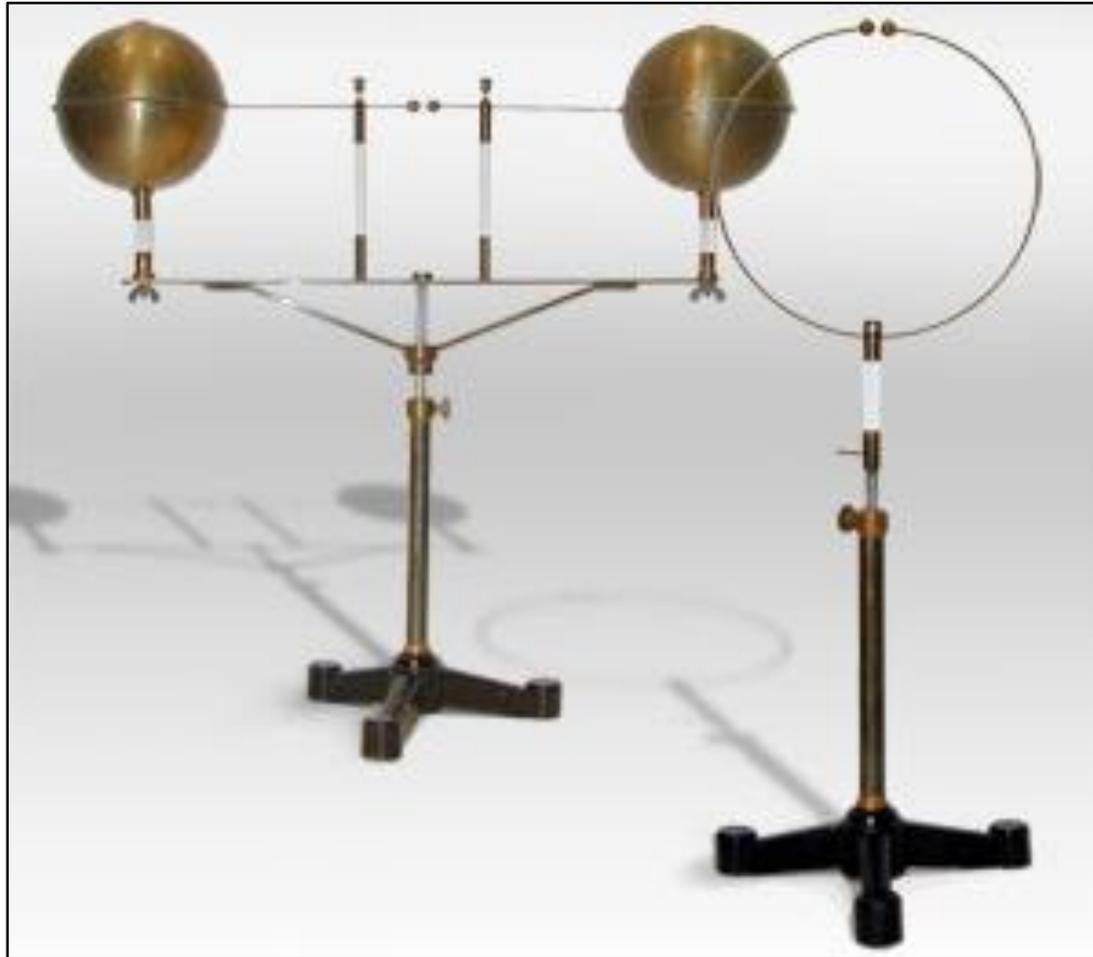
- Experimento de Hertz



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 trans-oceânica

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 em frequências de RF
  - Impacto social  $\Rightarrow$  informação rápida e para todos
- RADAR operando em micro-ondas
  - Objetivo: detectar aviões e navios
  - Tecnologia utilizada
    - Válvula Klystron - geração de micro-ondas
    - Antenas refletoras de alto ganho
    - Guias de ondas – conectar o sinal de micro-ondas à antena RADAR com baixas perdas

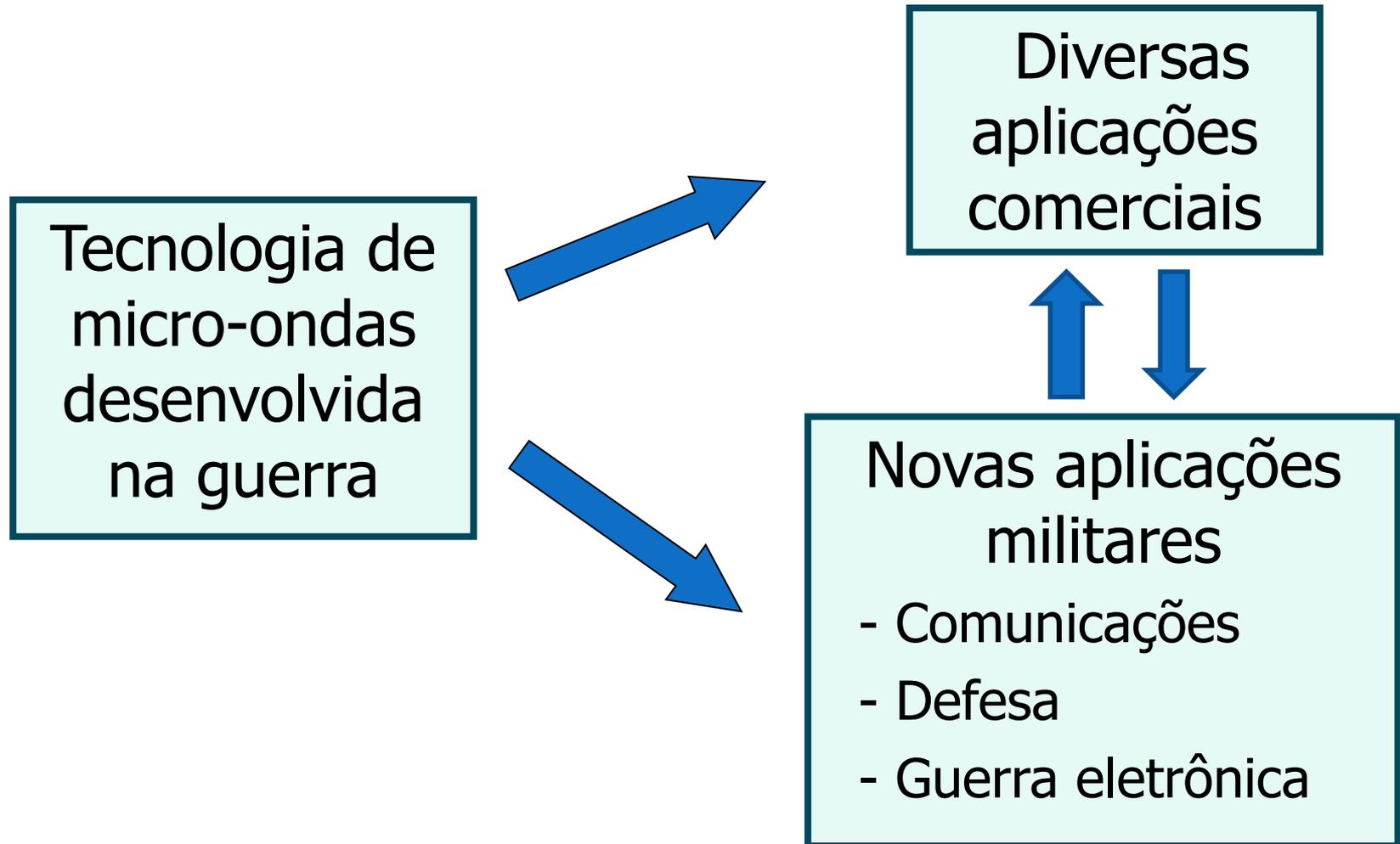
# Aspectos Históricos

## 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 → 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 recepção de sinais 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!**

**Nos dias atuais....**

# **APLICAÇÕES DE RF E MICRO-ONDAS**

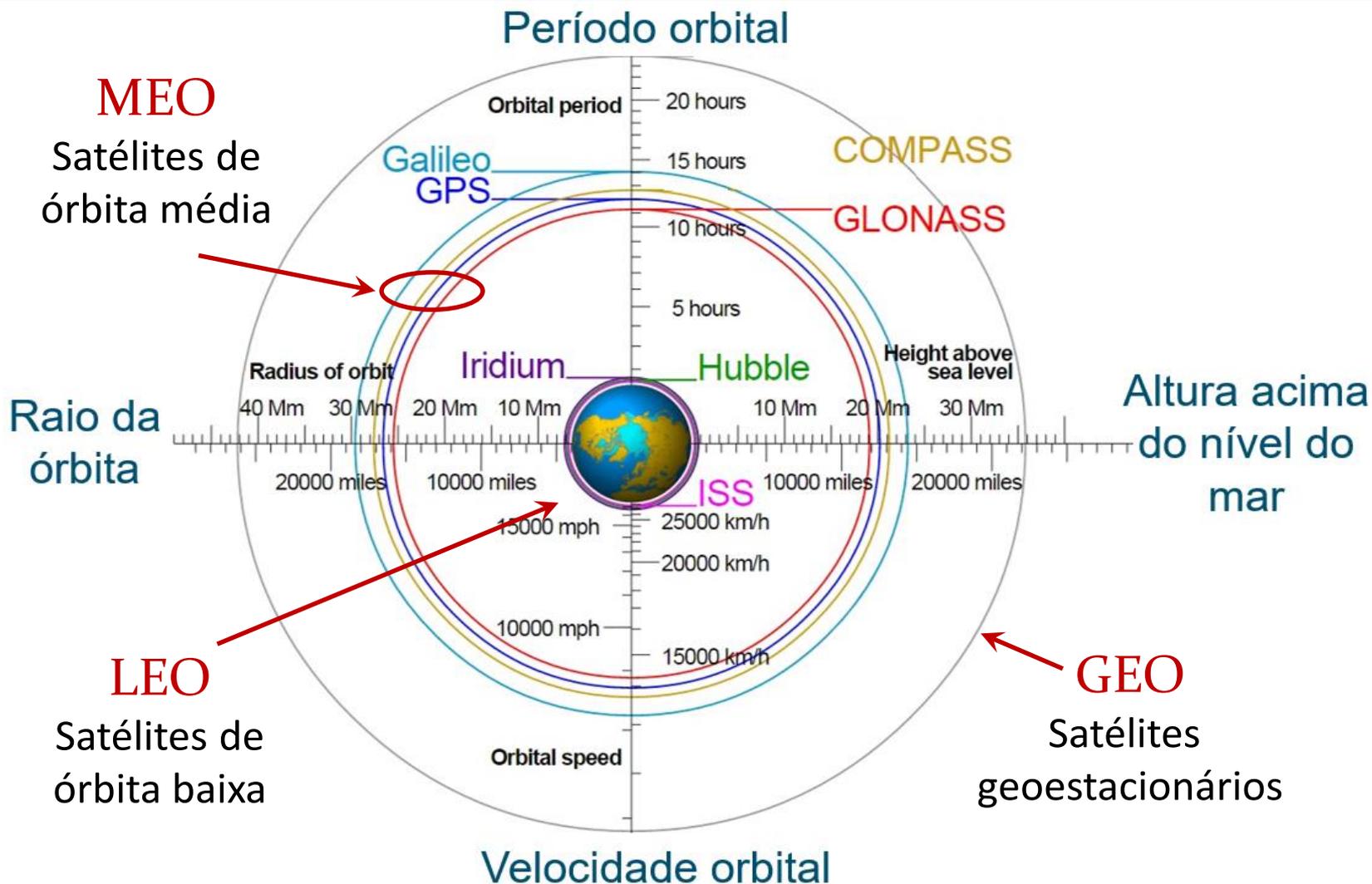
# Sistemas de Satélites Artificiais



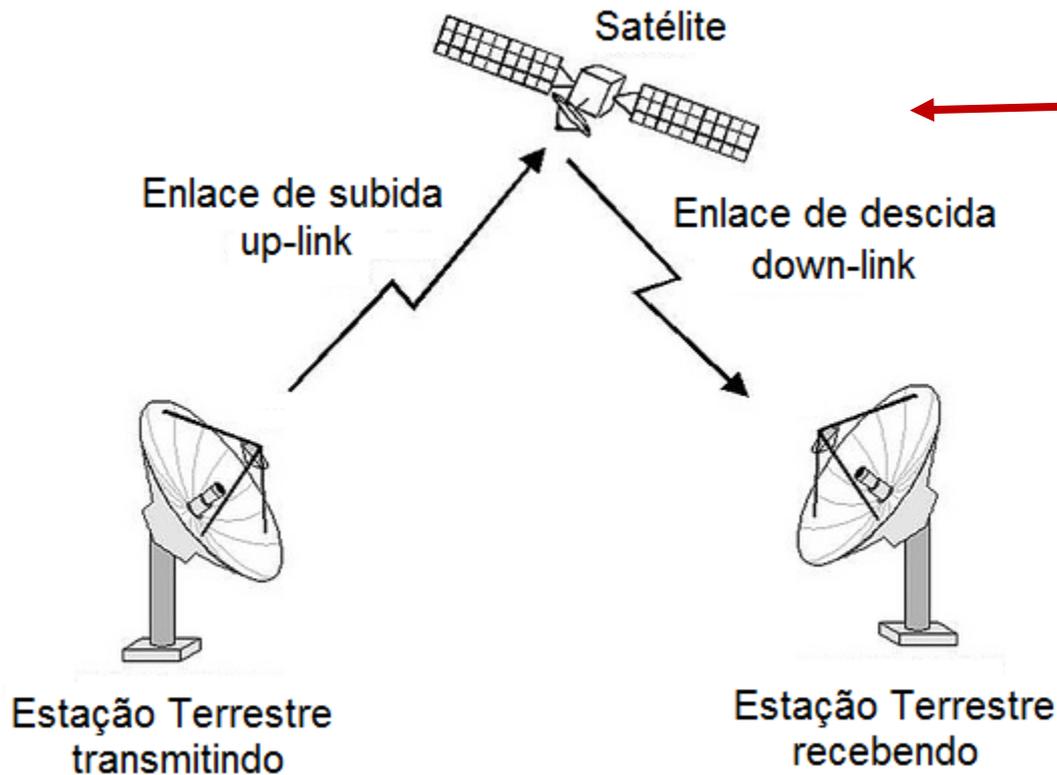
# Sistemas de Satélites Artificiais

- 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



# Satélite Geoestacionário



## Satélite

- receptor
- transmissor
- antenas
- painéis solares

## 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**
  - GEO - Geosynchronous Earth Orbit
    - Satélites em **órbita geossíncrona ou geoestacionária**
    - Órbita de  $\approx$  **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

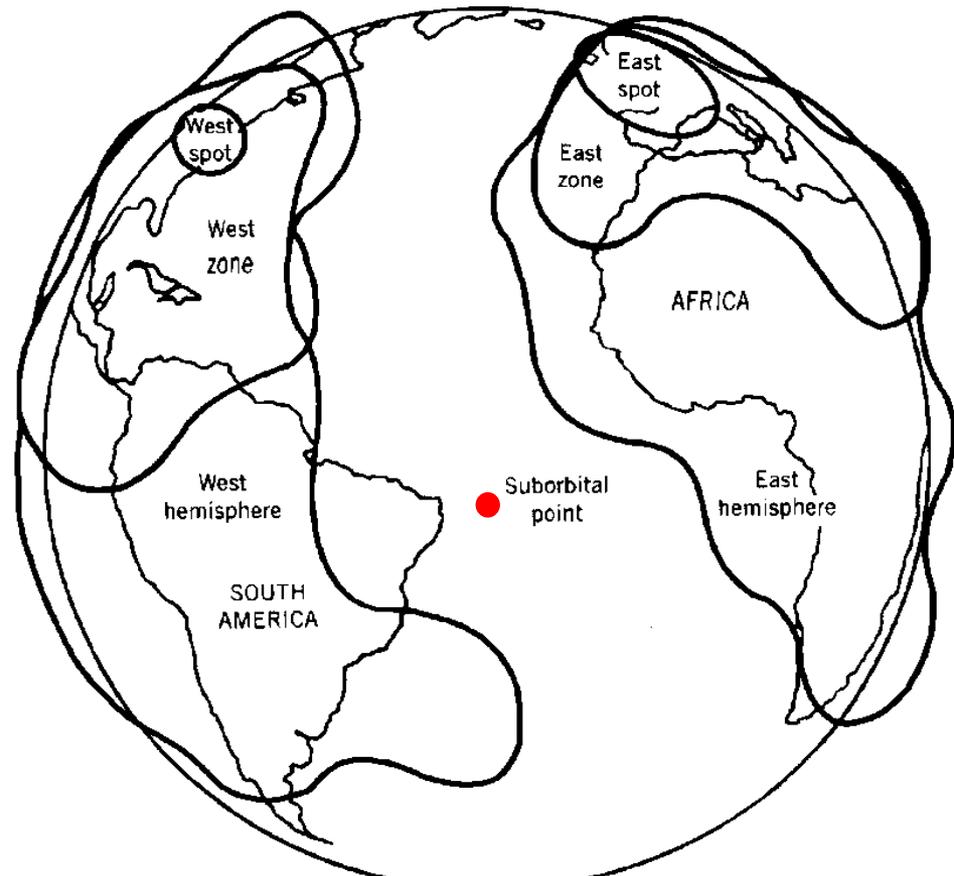
# Sistemas de Satélites Artificiais

- 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 Atlântico INTELSAT V - GEO

Cobertura das antenas do satélite



# Satélite Geoestacionário

**Satélite**  
**INTELSAT 9**  
**ATLÂNTICO**

Banda C  
3,7 a 4,2 GHz

Banda Ku  
10,75 a 12,75 GHz

Área iluminada  
pelo feixe “BRAZIL”

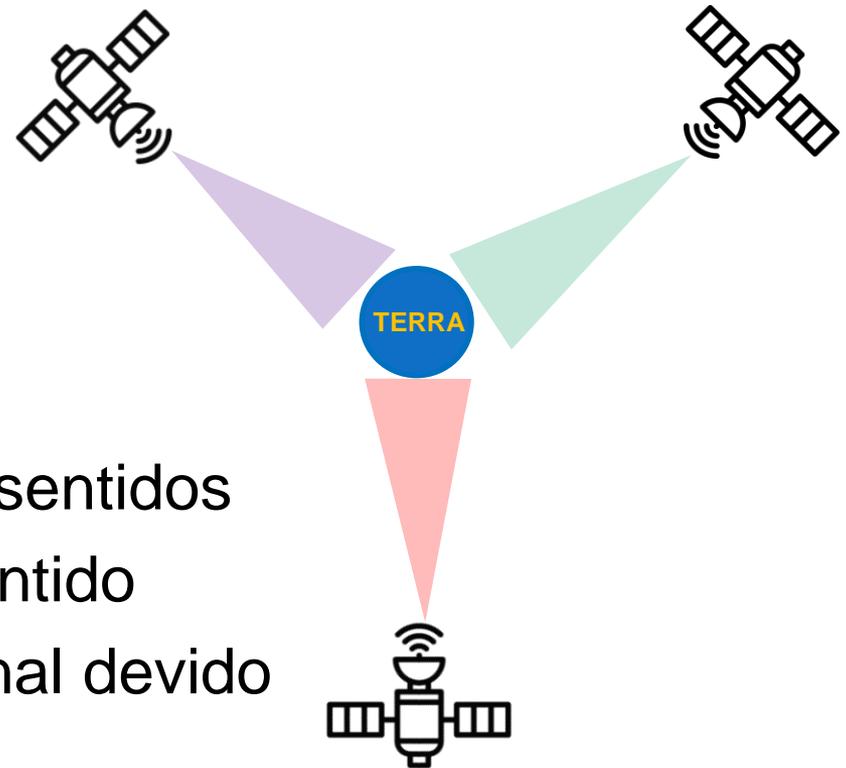
<http://www.lyngsat-maps.com/>



# 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
  - cabo submarino, no outro sentido
  - minimização do atraso do sinal devido ao tempo de propagação



# Sistemas de Satélites Artificiais

## Sistemas com satélites artificiais MEO

- MEO – **Medium Earth Orbit**
  - Órbita **10.000 km a 20.000 km** acima do nível do mar
  - Órbita intermediária entre GEO e LEO
  - Movem-se em relação ao solo
- Exemplo – **Sistemas de posicionamento global**
  - GPS – norte americano
  - GALILEO – Comunidade Européia
  - GLONASS – russo
  - COMPASS – chinês

# Sistemas de Satélites Artificiais

## Sistemas com satélites artificiais **MEO**

- **GPS**

- Sistema de posicionamento global norte-americano
- Órbita de 20.200 km acima do nível do mar
- Período orbital de 12 horas
- Rede de 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



# 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 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

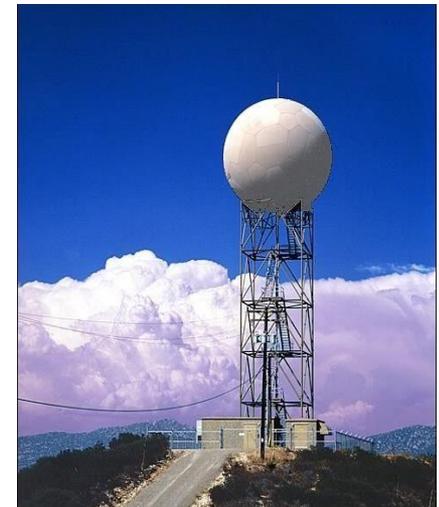
- **Radares militares**
  - Detecção de alvos
- **Radares civis**
  - Radar para monitoramento de tráfego aéreo



- 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

$$t = t_1$$

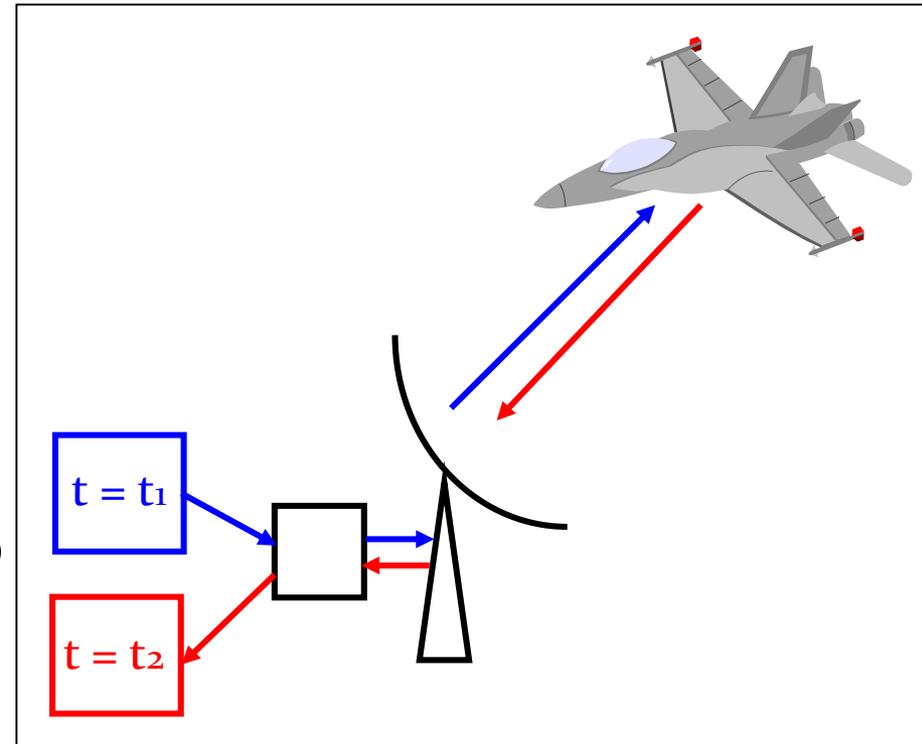
### • Se houver um alvo nessa direção

- 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

$$d = c \cdot \Delta t/2$$

c: velocidade da luz no vácuo

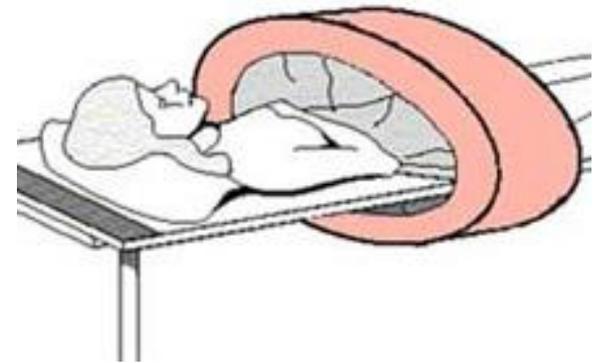
# Aplicações Médicas e Industriais

- **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

**The Very Large Array of Radio Telescopes**  
Credit: [VLA, NRAO](#)



# 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
  - Dividido em bandas de frequência
- Uso do espectro eletromagnético
  - Regulamentado por agências internacionais e nacionais
  - Objetivo de minimizar interferências eletromagnéticas
- Agências regulamentadoras
  - Para cada aplicação de ondas eletromagnéticas, define
    - Banda de frequência a ser utilizada
    - Máxima potência que pode ser radiada

# 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

Faixa de RF

\* $\lambda_0 = c/f$  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 $\mu\text{m}$	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

\* $\lambda_0 = c/f$  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
- Sistemas RADAR
- Radioastronomia

Máxima potência radiada  
depende da aplicação

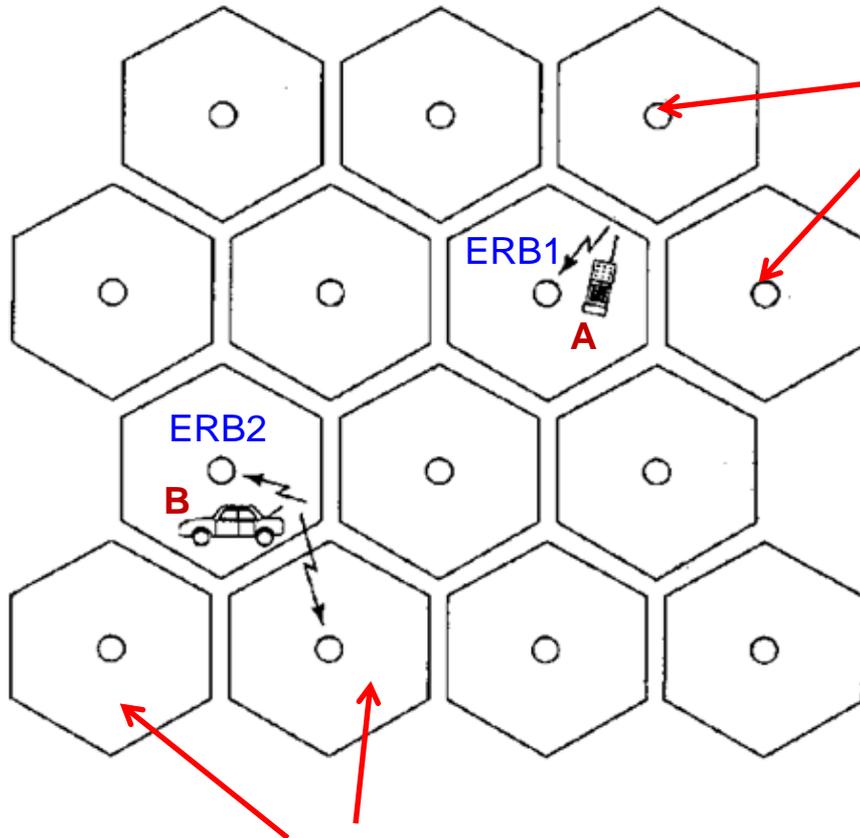
# Exemplo de Frequências Licenciadas

## Telefonia Celular/Dados

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
2620 – 2690 MHz	(downlink)	
703 – 748 MHz	(uplink)	4G
758 – 803 MHz	(downlink)	

Uplink: Usuário → Estação Rádio Base      Downlink: Estação Rádio Base → Usuário

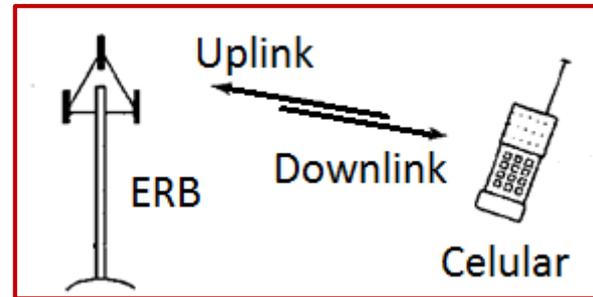
# Sistema de Telefonia Celular



Área de cobertura celular

## ERB

Estação Rádio Base



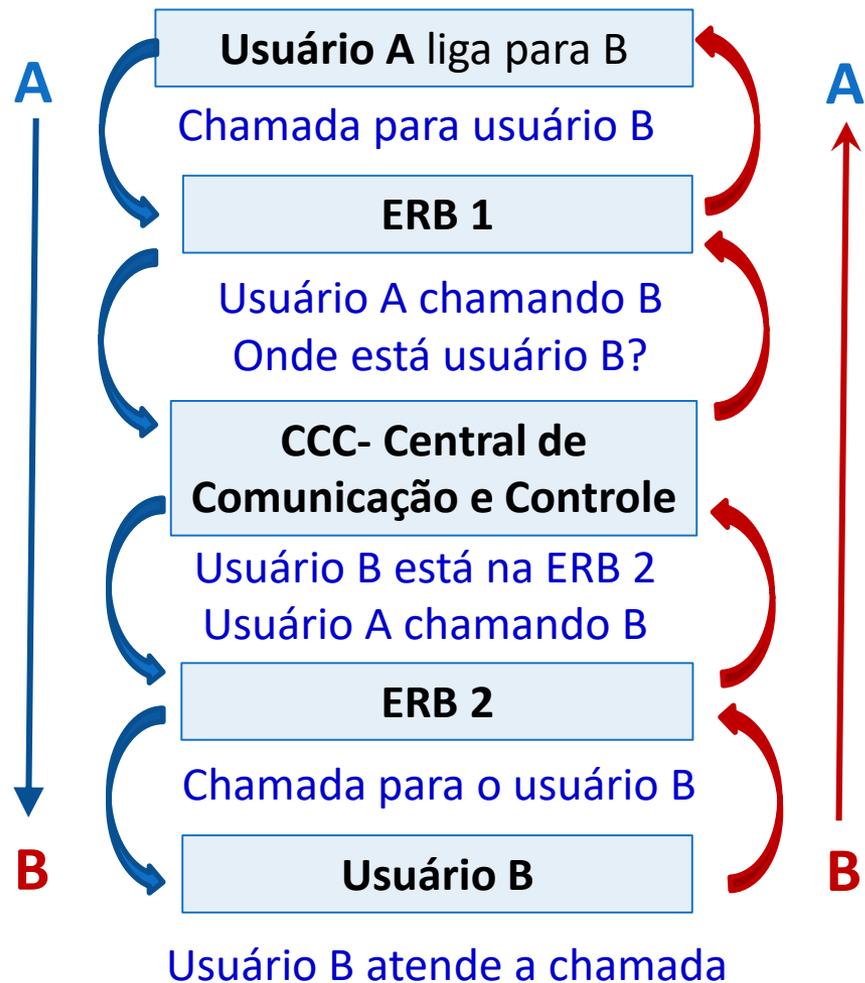
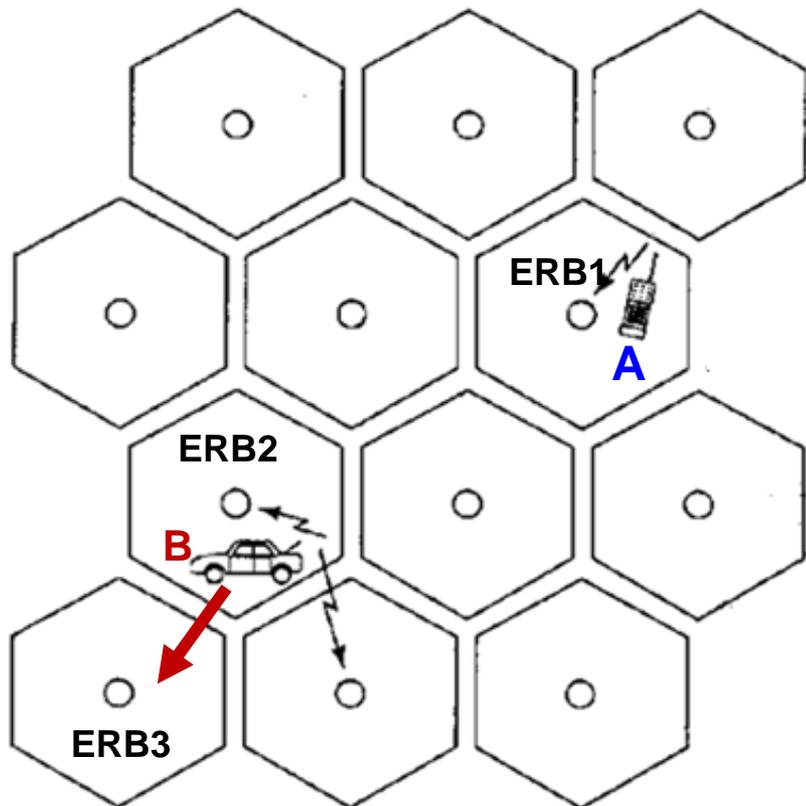
Uplink ou enlace de subida

Comunicação Celular → ERB

Downlink ou enlace de descida

Comunicação ERB → celular

- Comunicação entre os usuários **A** e **B**



Se o **usuário B** desloca-se para a célula da **ERB3**, sua conexão passa da **ERB2** para a **ERB3**

# Torre de ERB de Telefonia Celular



## Antenas parabólicas

- Comunicação entre a ERB e a Central de Comutação e Controle
- Comunicação ponto-a-ponto
- Antenas direcionais
- Alto ganho
- Feixe estreito

## Antenas setoriais

- Comunicação entre a ERB e usuários móveis
- Comunicação ponto-multiponto
- Feixe largo para atender vários usuários
- Feixes de 90 a 120 graus, p.e.

# Torre de ERB de Telefonia Celular

## Antenas parabólicas

Comunicação entre a ERB e a Central de Comutação e Controle



## Antenas setoriais

Comunicação entre a ERB e os usuários móveis



# Exemplos de Frequências Licenciadas GPS, Comunicação e TV via Satélite

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 e suas aplicações

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

<sup>1</sup>RFID – *Radio Frequency Identification*

<sup>2</sup> Portas de garagem, alarmes de carros e controle remoto de brinquedos

# Faixas de frequências ISM e suas aplicações

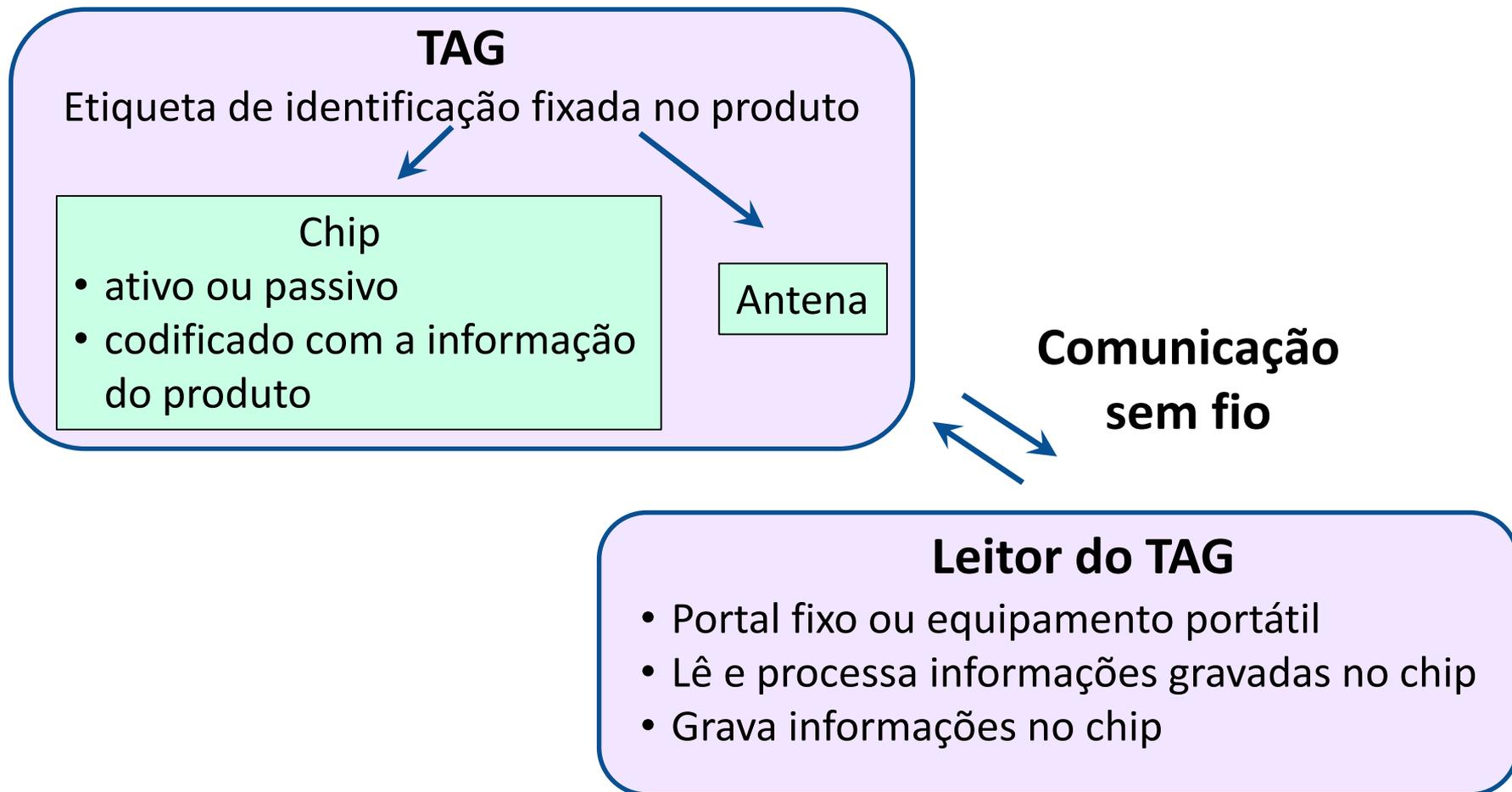
Faixas de frequência	Frequência central	Exemplos de uso
2,400 a 2,500 GHz	2,45 GHz	Forno de micro-ondas Telefone sem fio WiFi , WiMAX, ZigBee
5,725 a 5,875 GHz	5,8 GHz	Telefone sem fio WiFi, WiMAX
24,00 a 24,25 GHz	24,125 GHz	Serviço de satélite amador
61,0 a 61,5 GHz	61,25 GHz	Comunicação intersatélites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

# 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
  - Tornozeleira eletrônica

# Exemplo de Frequências Licenciadas

## RFID - Identificação por meio de rádio frequência



# RFID - Identificação por meio de rádio frequência

TAG de RFID

Chip  
Antena



TAG de pedágio eletrônico colado no vidro do carro



Sistema de pedágio eletrônico



# RFID - Identificação por meio de rádio frequência

Sistema de pedágio eletrônico “free flow” – sem catraca

- Implantação na Rodovia Rio-Santos em fevereiro de 2023
  - Uso de TAGs de RFID, ou
  - Reconhecimento da placa do veículo



# Aplicações em frequências ISM

## Aquecimento por micro-ondas

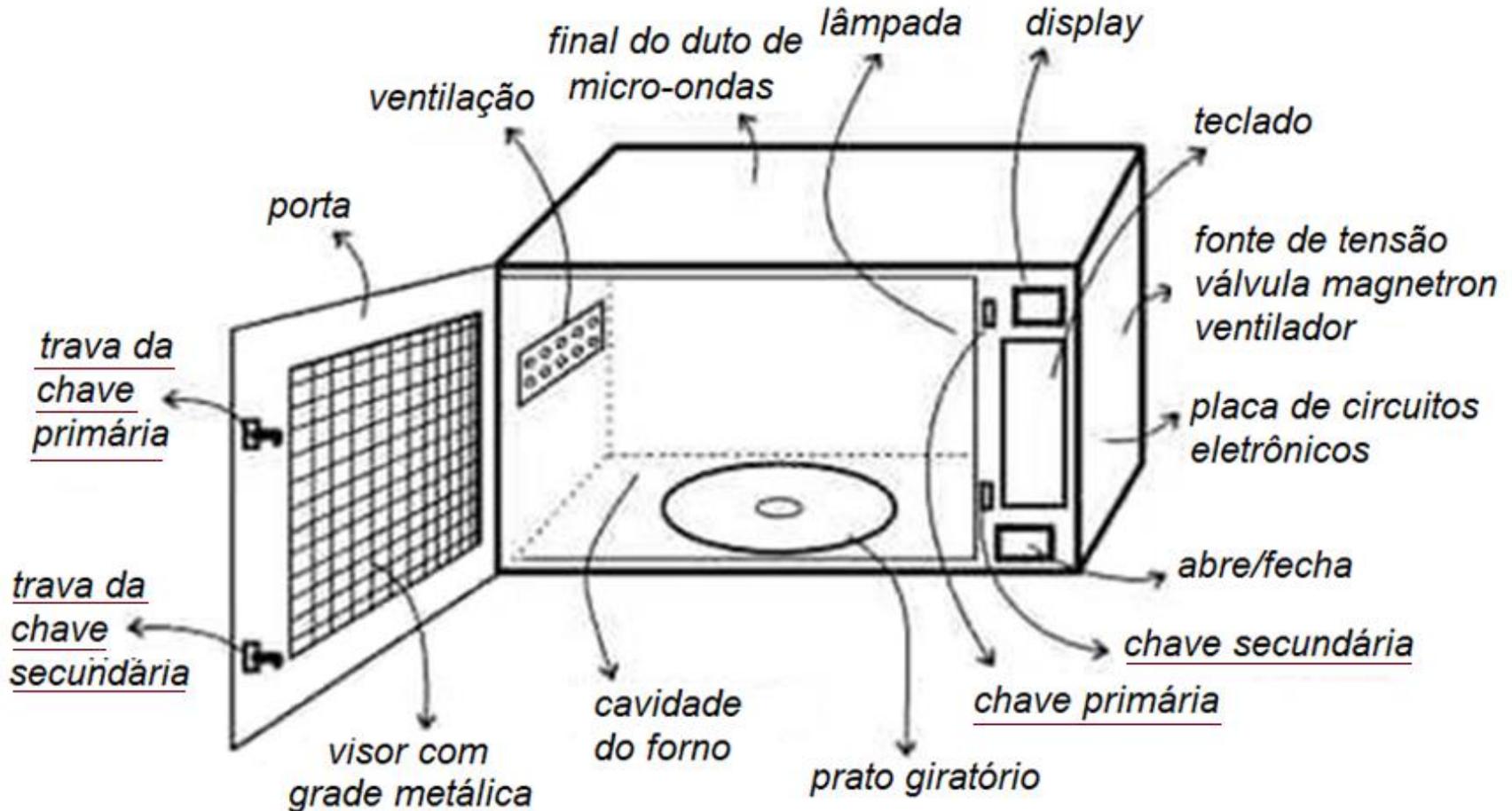
### Exemplos de aplicação

- Fornos domésticos
  - Aquecimento de alimentos
- Fornos industriais
  - Secagem de grãos
  - Catalização de reações químicas
- Aplicações médicas
  - Hipertermia para tratamento de tumores

# Fornos de micro-ondas domésticos

- Princípio de operação
  - Alimentos são radiados por micro-ondas
  - Geração de calor → sinal de micro-ondas dissipado pelas perdas condutivas da água contida nos alimentos
- Frequência de operação
  - 2,45 GHz, usualmente
  - 915 MHz se preciso maior profundidade de penetração
- Potência de operação
  - 500 W a 1.000 W, usualmente
- Estrutura do forno
  - Cavidade metálica, confina a potência de micro-ondas
  - Cuidados especiais para reduzir radiação pela porta do forno

# Fornos de micro-ondas domésticos



*Aberturas na grade metálica  $\ll \lambda$   
 $f=2,45 \text{ GHz} \rightarrow \lambda=c/f = 122,4 \text{ mm} \rightarrow \text{Aberturas} \approx 1 \text{ mm}$*

# Vantagens de usar micro-ondas

1. Espectro de RF → 30 KHz até 300 MHz
  - Já está bastante ocupado
  - Novos sistemas de comunicação precisam de novas frequências
2. 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

## 3. Frequências mais altas → maiores bandas de informação

- Sistemas de comunicação usuais

$f_0$  → frequência portadora

$BW$  → banda de informação transmitida → 10% de  $f_0$

- Exemplo – transmissão de canais de TV

- Banda ocupada por um canal de TV → 6 MHz

**Sistema operando em 600 MHz**

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

→ 10 canais de TV

**Sistema operando em 6 GHz**

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

→ 100 canais de TV

# Vantagens de usar micro-ondas

## 4. Antenas de micro-ondas associam

- Alto ganho
- Alta diretividade
- Dimensões razoavelmente pequenas  
(proporcionais à  $\lambda = c/f$ )

## 5. Micro-ondas atravessam a ionosfera

- Comunicação entre a Terra e o espaço
- Satélites artificiais
- Naves e sondas espaciais
- Pesquisa sobre vida extraterrestre

# 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)

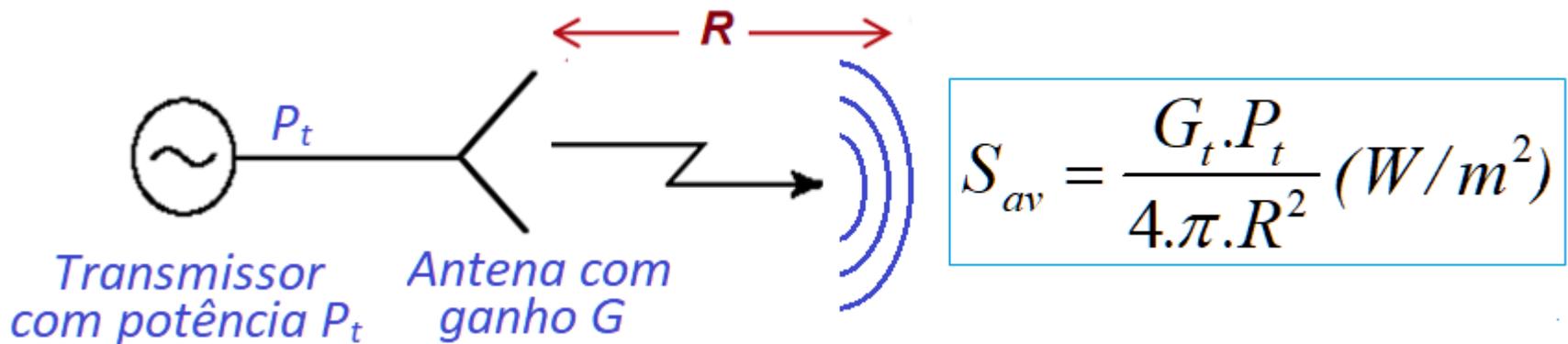
# Níveis Seguros de Radiação

- 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:  
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/cm<sup>2</sup>
  - Densidade média de potência à distância R da antena



# Níveis Seguros de Radiação

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

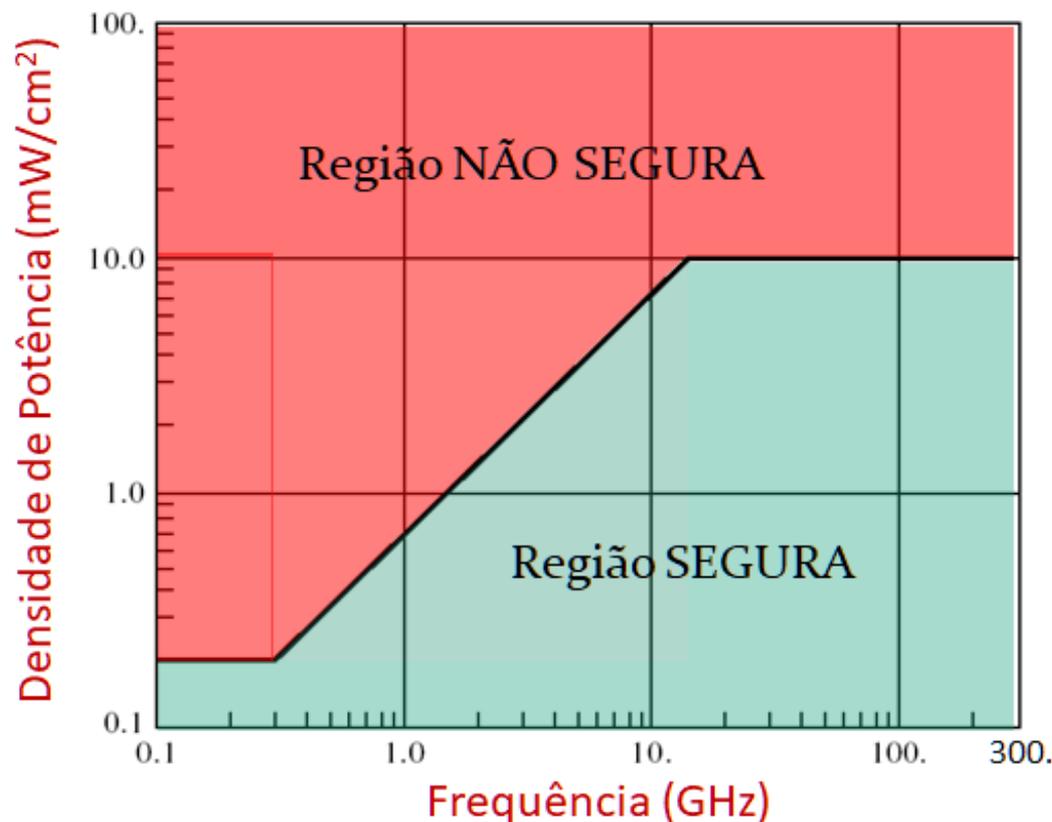
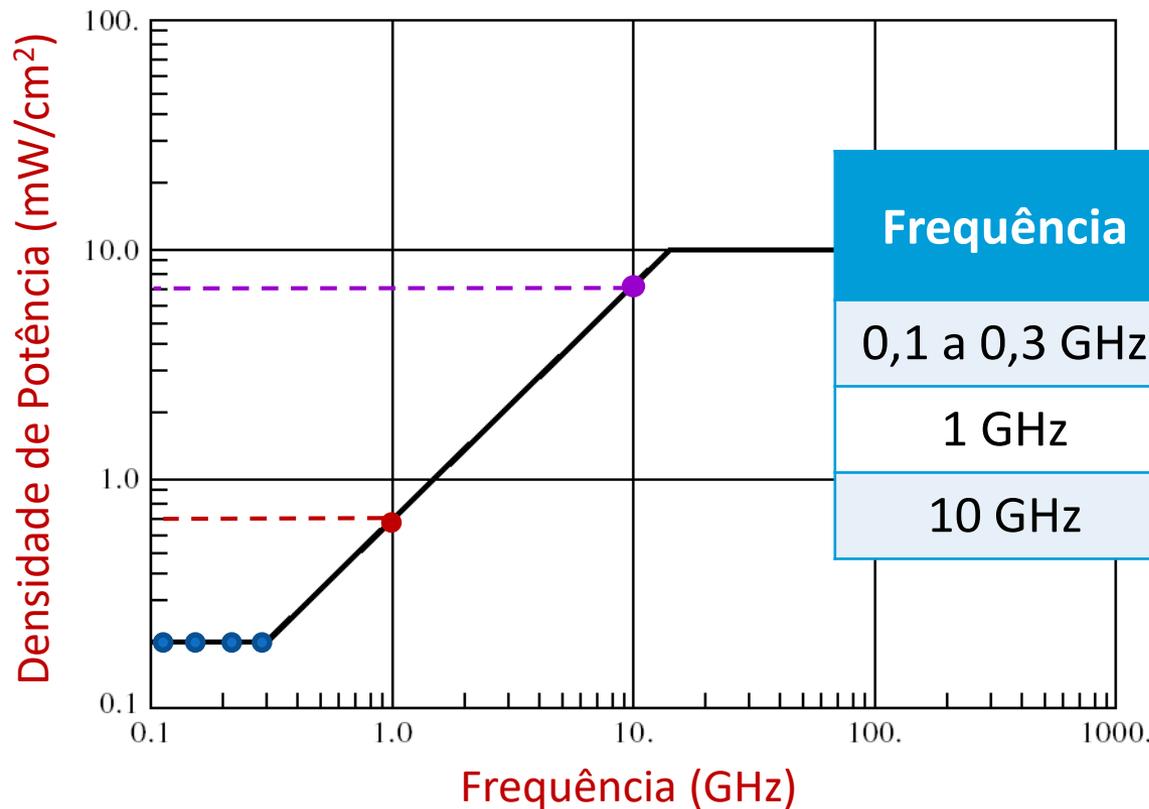


Figura 13.29, *Microwave Engineering*, David M. Pozar

# Níveis Seguros de Radiação

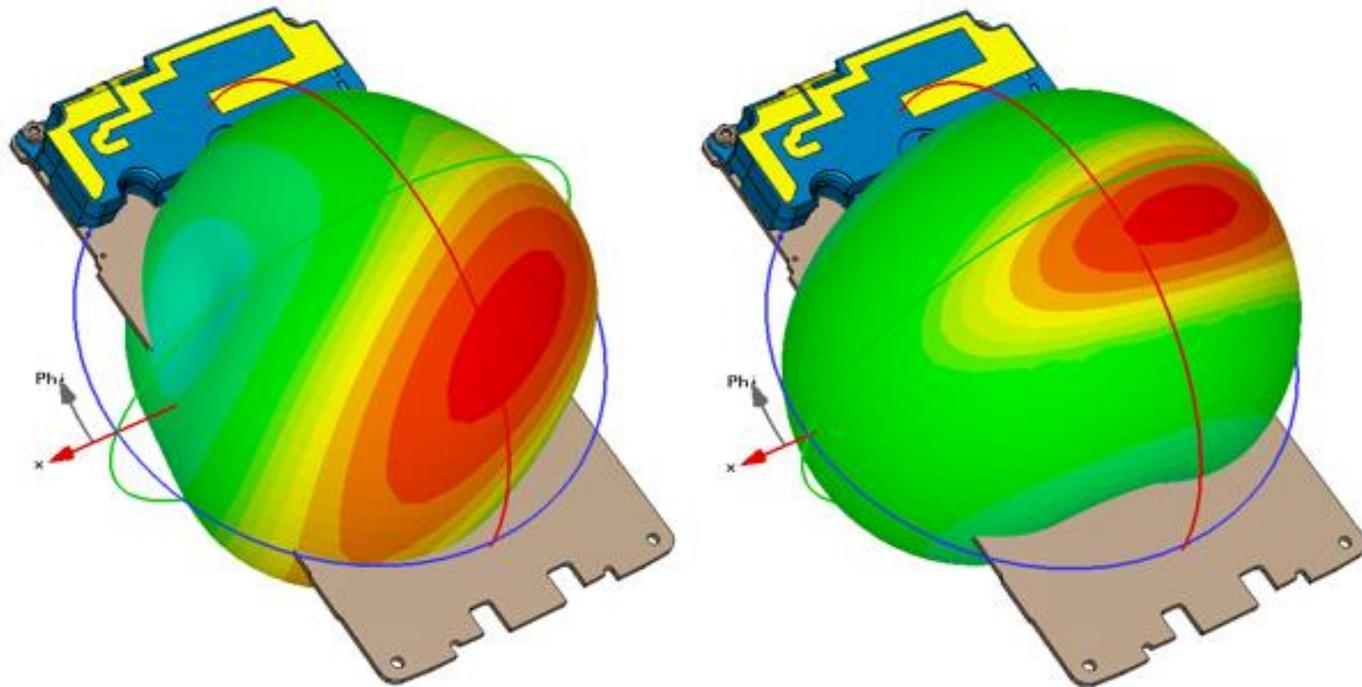
- Norma dos Estados Unidos
- Efeitos térmicos de RF e micro-ondas – limite para exposição contínua



Frequência	Níveis seguros de radiação
0,1 a 0,3 GHz	$\leq 0,2 \text{ mW/cm}^2$
1 GHz	$\leq 0,7 \text{ mW/cm}^2$
10 GHz	$\leq 7 \text{ mW/cm}^2$

# Níveis Seguros de Radiação

Diagrama de radiação da antena do telefone celular na banda GSM

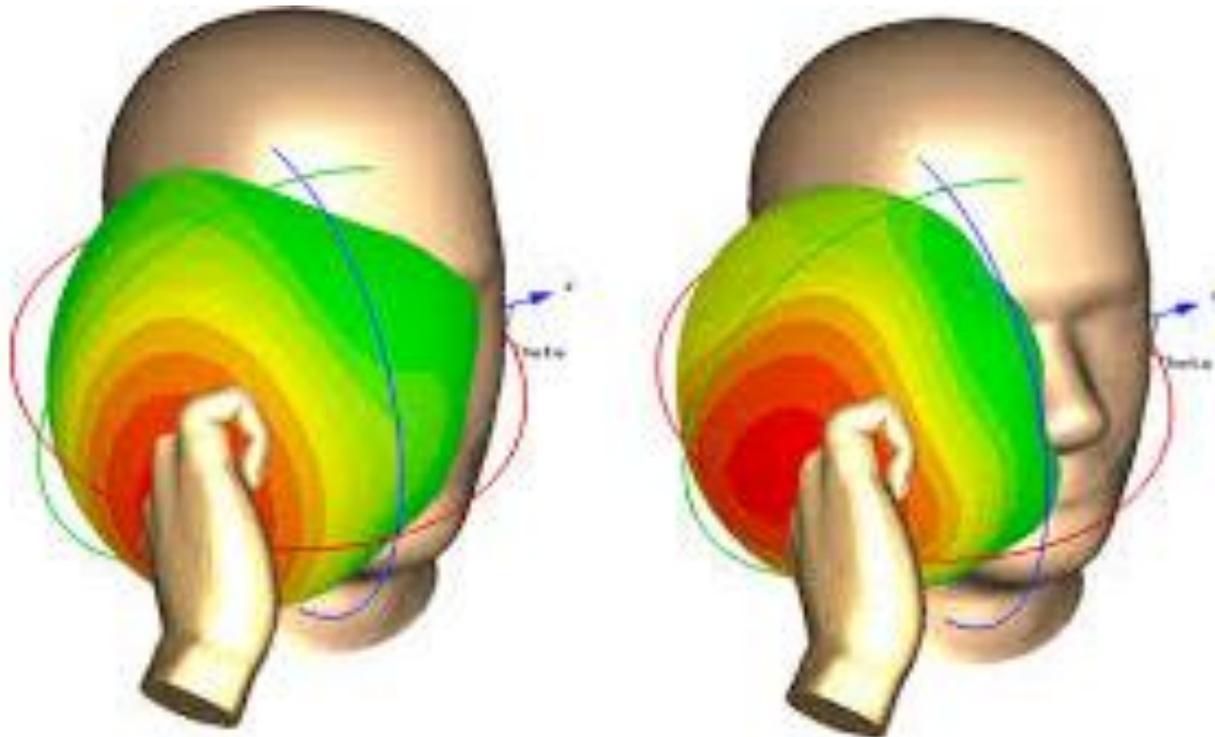


Fonte: <http://www.raymaps.com/>

**ALERTA: Efeitos biológicos de radiação por RF e micro-ondas é um tema cujo estudo está em andamento. EVITE exposição prolongada.**

# Níveis Seguros de Radiação

Diagrama de radiação da antena do telefone celular na banda GSM  
(Simulação EM 3D)



Fonte: <http://www.raymaps.com/>

**EVITE exposição prolongada.**

# Níveis Seguros de Radiação

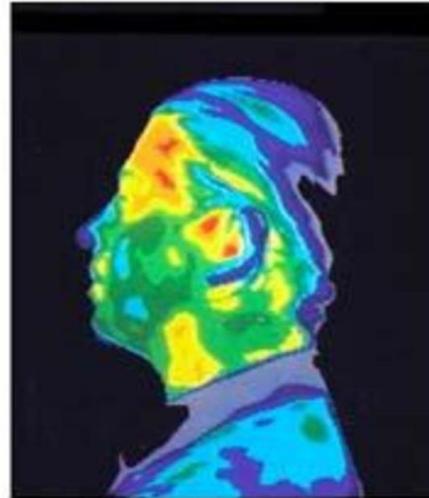
Tomografia da cabeça

**Imagem da esquerda**

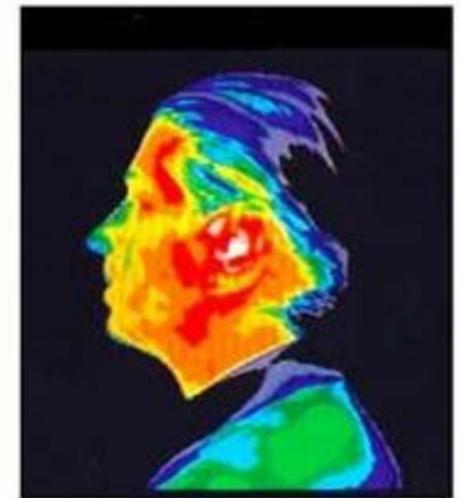
- Sem exposição ao telefone celular

**Imagem da direita**

- Após 15 minutos de exposição ao telefone celular
- Áreas em amarelo e vermelho: temperaturas mais altas



*Thermographic Image of the head with no exposure to harmful cell phone radiation.*



*Thermographic Image of the head after a 15-minute phone call. Yellow and red areas indicate thermal (heating) effects that can cause negative health effects.*

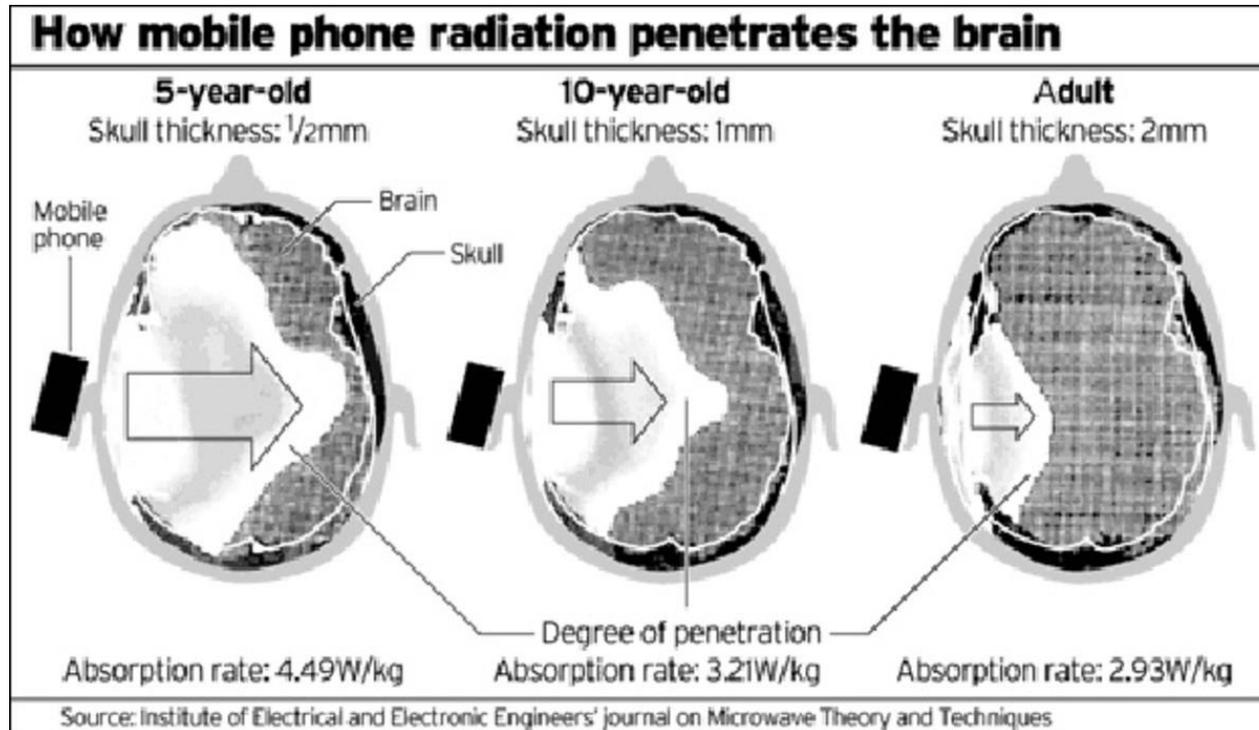
<https://turbofuture.com/cell-phones/How-To-Protect-Yourself-From-Harmful-Mobile-Cell-Phone-EMF-RF-Radiation>

**EVITE exposição prolongada.**

# Níveis Seguros de Radiação

Penetração da radiação do telefone celular no cérebro

**5 anos de idade**  
Espessura do crânio:  
**0,5 mm**



**Adulto**  
Espessura do crânio:  
**2 mm**

<https://turbofuture.com/cell-phones/How-To-Protect-Yourself-From-Harmful-Mobile-Cell-Phone-EMF-RF-Radiation>

**EVITE exposição prolongada, especialmente em crianças.**



# UNIDADES DE FREQUÊNCIA, GANHO E POTÊNCIA

# Unidades

## Unidades de frequência

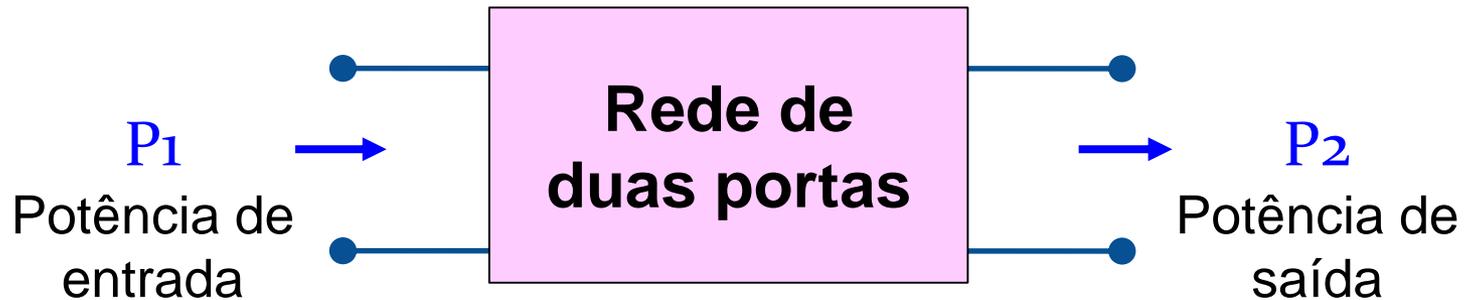
Unidade	Equivalência
1 Hz	1 ciclo/segundo
1 kHz	$10^3$ Hz
1 MHz	$10^6$ Hz
1 GHz	$10^9$ Hz
1 THz	$10^{12}$ Hz

# Unidades

## Decibéis

- Unidade logarítmica relativa
- Usada para expressar ganho e potência
- **Ganho → dB e dBi**
  - dB → Ganho de amplificadores
  - dBi → Ganho de antenas
- **Potência → dBm, dBW**
  - dBm → decibéis acima de 1 mW
  - dBW → decibéis acima de 1 W

# Unidades de ganho



- Ganho de potência  $G_p$  (linear)

$$G_p = \frac{P_2}{P_1} \rightarrow \text{Adimensional}$$

- Ganho de potência em dB

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

## Exemplos de redes com ganho

$$G_p = \frac{P_2}{P_1} > 1$$

$$G_p(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G_p) > 0$$

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

# Unidades de ganho



- Redes com perdas → atenuadores, filtros,...

$$P_2 < P_1 \rightarrow G_p = \frac{P_2}{P_1} < 1$$

- Ganho de potência em dB

$$G_p(dB) = 10 \cdot \log(G_p) < 0$$

## Exemplos de redes com perda

$$G_p = \frac{P_2}{P_1} < 1$$

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

$G_p(\text{linear})$	$G_p(\text{dB})$	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

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

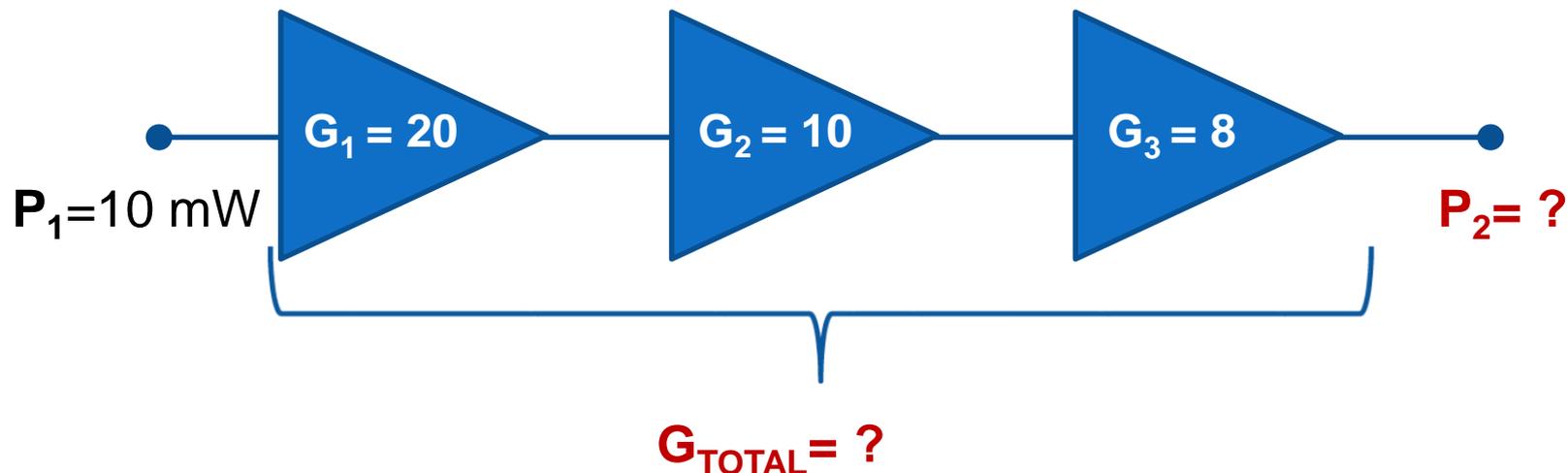
## Exemplos

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

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

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

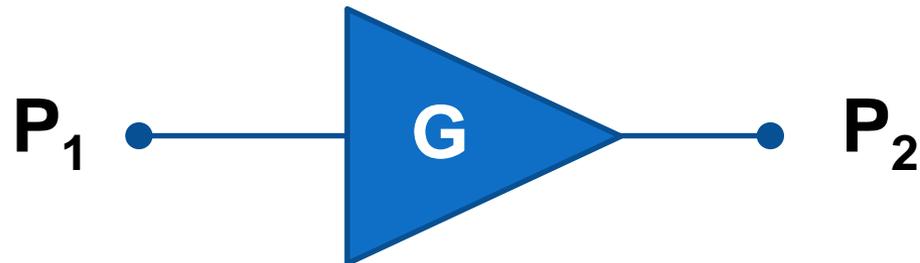
- Cálculos lineares de ganho e potência



$$G_{TOTAL} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 1.600$$

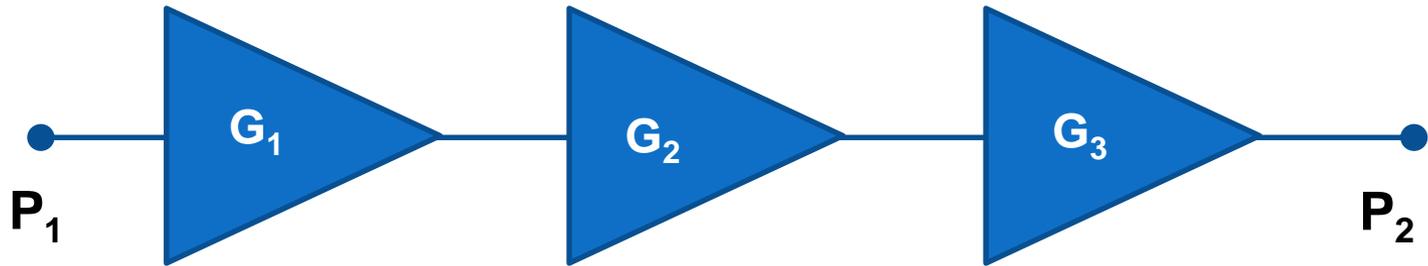
$$P_2 = G_{TOTAL} \cdot P_1 = 16.000 \text{ mW} = 16 \text{ W}$$

# Ganho de potência em decibéis



Ganho de potência	Ganho de potência em decibéis
$G = \frac{P_2}{P_1}$	$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$
Adimensional	Unidade: dB

# Ganho de potência em decibéis



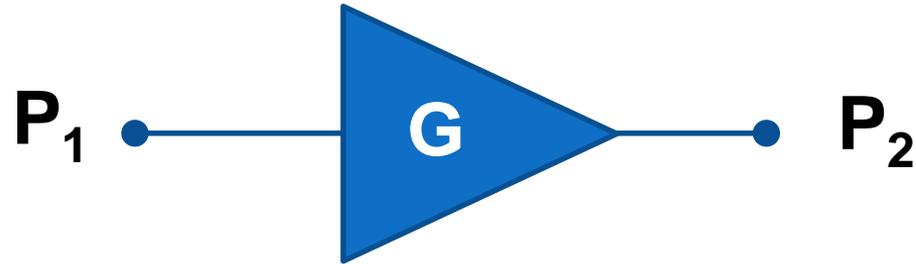
- Ganho total (linear)  $\rightarrow G_{total} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3$
- Ganho total em decibéis  $\rightarrow G_{total}(dB) = 10 \cdot \log(G_1 \cdot G_2 \cdot G_3)$
- Usando a propriedade do produto do logaritmo

$$G_{total}(dB) = 10 \cdot \log(G_1) + 10 \cdot \log(G_2) + 10 \cdot \log(G_3)$$

- Logo

$$G_{total}(dB) = G_1(dB) + G_2(dB) + G_3(dB)$$

# Potência em decibéis



$$P_2(mW) = G \cdot P_1(mW) \rightarrow P_2(dBm) = 10 \cdot \log \left( G \cdot \frac{P_1(mW)}{1 mW} \right)$$

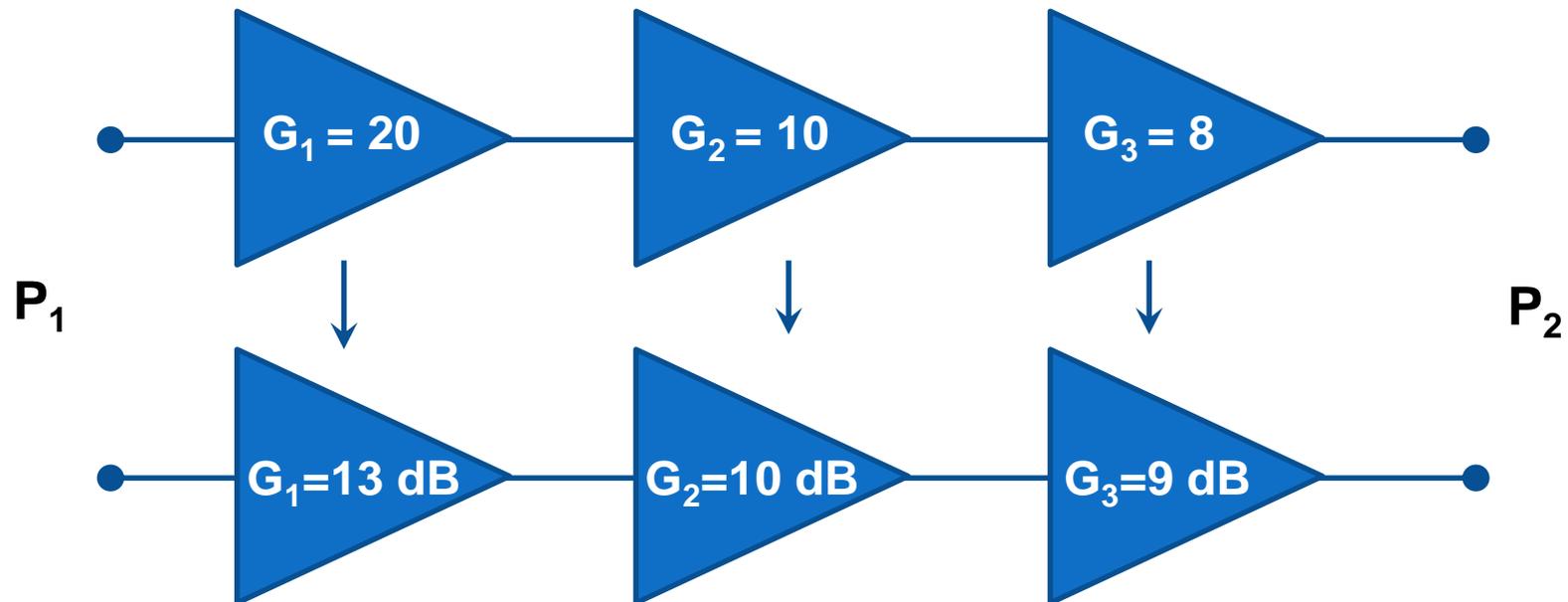
$$P_2(dBm) = 10 \cdot \log(G) + 10 \cdot \log \left( \frac{P_1(mW)}{1 mW} \right)$$

ou

$$P_2(dBm) = G(dB) + P_1(dBm)$$

# Ganho de potência em decibéis

$$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$$

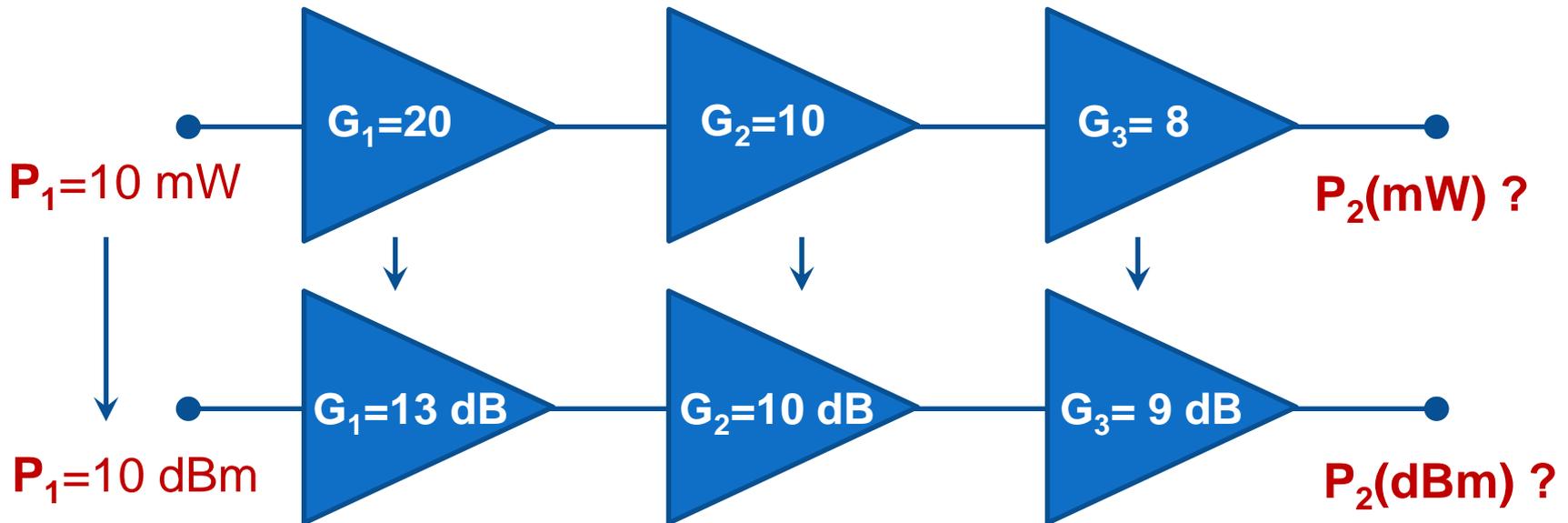


$$G_{total} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 1.600$$

$$G_{total}(dB) = G_1(dB) + G_2(dB) + G_3(dB) = 32 \text{ dB}$$

# Potência em decibéis

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



$$P_2(\text{mW}) = G \cdot P_1(\text{mW}) = 1.600 \cdot 10 \text{ mW} = 16.000 \text{ mW}$$

$$P_2(\text{dBm}) = G(\text{dB}) + P_1(\text{dBm}) = 42 \text{ dBm}$$