

INTRODUÇÃO

PSI3483

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM MEIOS GUIADOS

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra

Sumário

- Espectro eletromagnético
 - Regulamentação
 - Exemplos de aplicação
- Níveis seguros de radiação
- Unidades de frequência, ganho e potência



ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Regulamentação e Aplicações

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
 - Largamente usadas em comunicação
 - 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

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
- 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

} RF

* $\lambda = c/f$ 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

Janelas de transmissão de sistemas ópticos

- Bandas de comprimentos de onda em que efeitos de atenuação e dispersão são mais fracos, favorecendo a transmissão

Designação	Descrição	Faixa de comprimentos de onda
Banda O	Original	1260 a 1360 nm
Banda E	Estendida	1360 a 1460 nm
Banda S	Comprimentos de onda curtos	1460 a 1530 nm
Banda C	Convencional	1530 a 1565 nm
Banda L	Comprimentos de onda longos	1565 a 1625 nm
Banda U	Comprimentos de onda ultra longos	1625 a 1675 nm

Agências Reguladoras

Regulamentam o uso do espectro eletromagnético

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

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

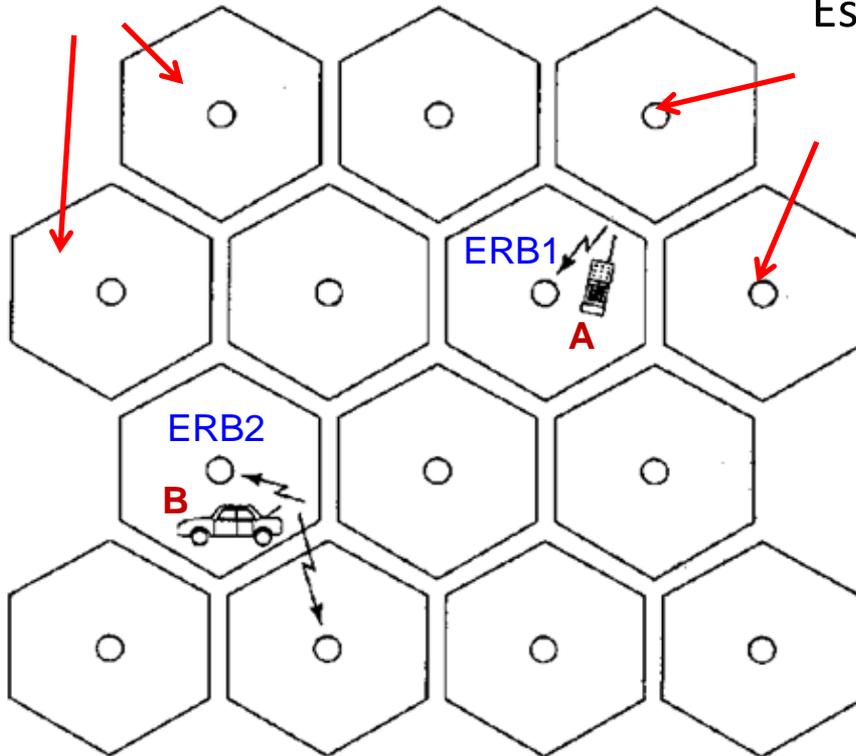
Exemplos de Frequências Licenciadas

Faixas de frequência		Aplicação	
824 – 845 MHz	Uplink	Telefonia celular	Ligações de voz via rede telefônica
869 – 994 MHz	Downlink	GSM 900	
1.710 – 1.755 MHz	Uplink	Telefonia celular	Dados mensagens, imagens, vídeo Voz sobre IP
1.805 – 1.850 MHz	Downlink	GSM 1800	
703 – 748 MHz	Uplink	4G	
758 – 803 MHz	Downlink	Faixa de 700 MHz	
2.500 – 2570 MHz	Uplink	4G	
2620 – 2690 MHz	Downlink	Faixa de 2.500 MHz	
3,7 – 3,8 GHz		5G ¹ Faixa de 3,5 GHz	

¹ Início de operação em agosto de 2022 na região metropolitana de São Paulo

Sistema de Telefonia Celular

Área de cobertura celular



ERB

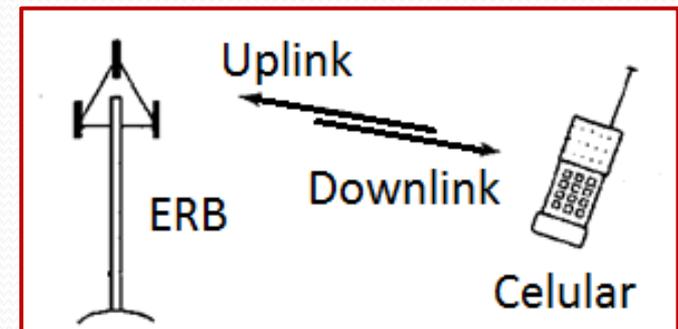
Estação Rádio Base
Estação fixa



Ligação

Celular A → Celular B

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



Uplink ou Enlace de Subida: Usuário → Estação Radio Base

Downlink ou Enlace de Descida: Estação Rádio Base → Usuário

Sistema de Telefonia Celular

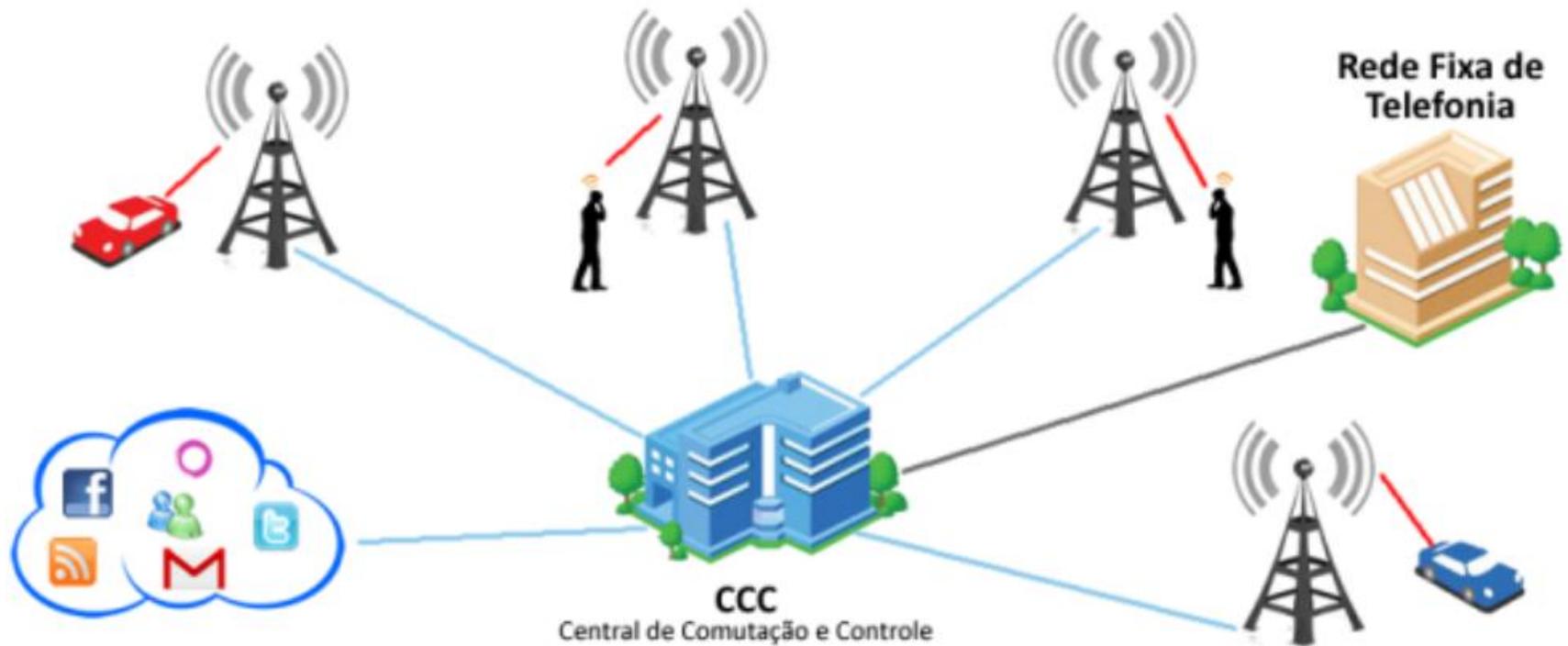
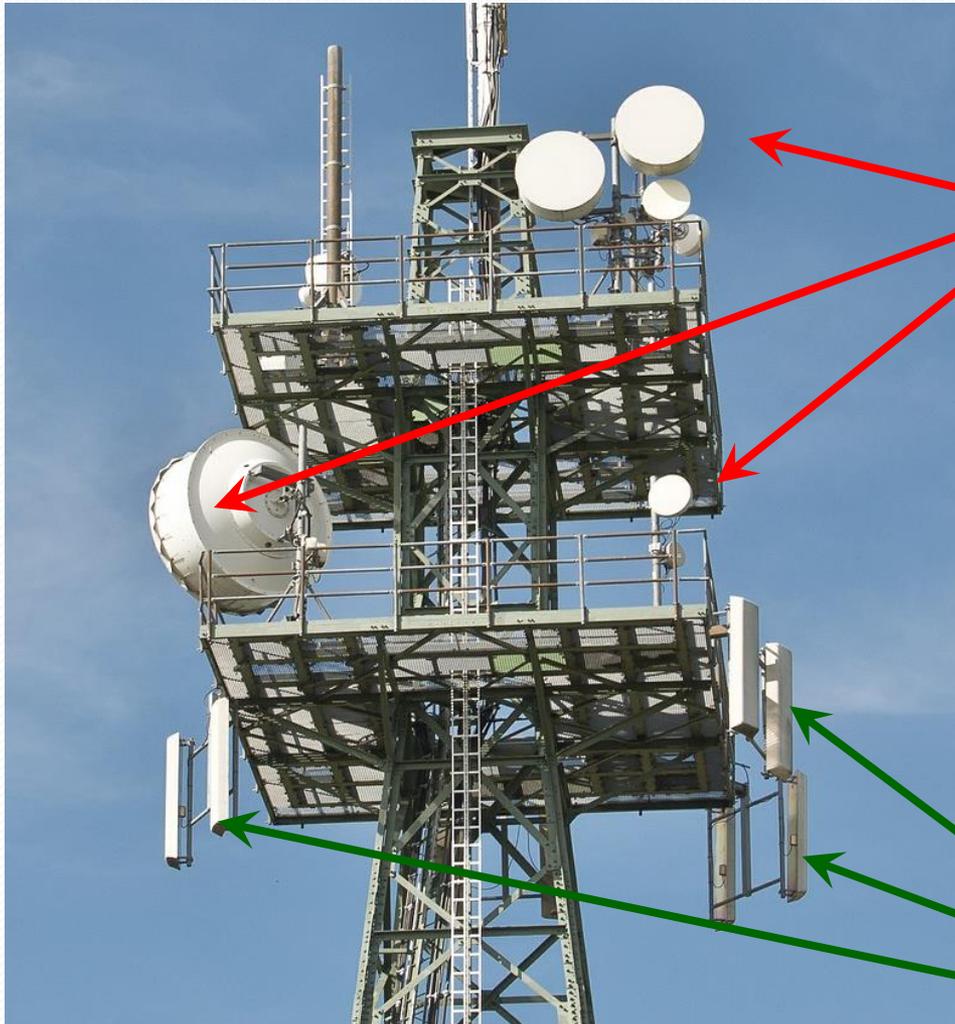


Imagem : *Telebrasil*

Torre de ERB de Telefonia Celular



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

As antenas estão dentro de
Radomes – estruturas
transparentes a micro-ondas,
que dão proteção física à
antena

Antenas setoriais para
comunicação entre a ERB e os
usuários móveis

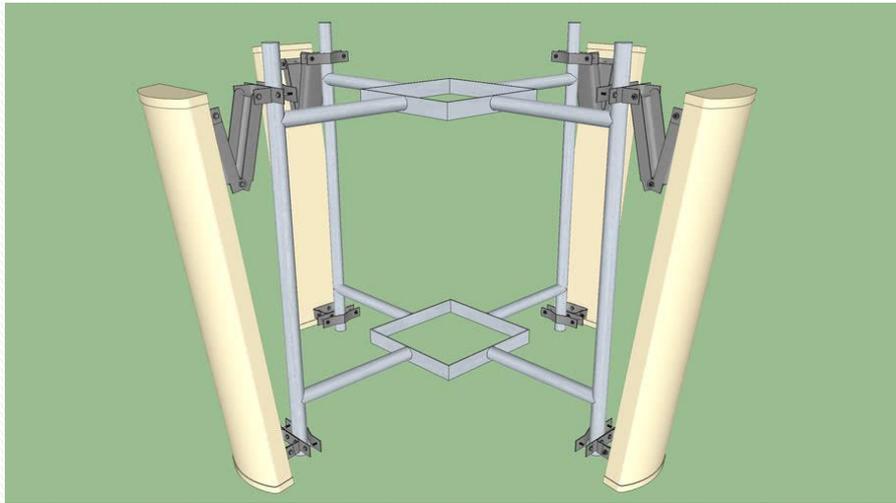
Torre de ERB de Telefonia Celular

Antena parabólica
com radome



Montagem de radome
em antena parabólica

Torre de ERB de Telefonia Celular



Conjunto de antenas setoriais

- Direcionadas para o solo (usuário)
- Cada antena cobre um setor do espaço, em geral usa-se
- 3 antenas cobrindo 120° cada uma
- 4 antenas cobrindo 90° cada uma

Antena setorial

- Montagem em poste
- Ajuste de inclinação



Exemplos de Frequências Licenciadas

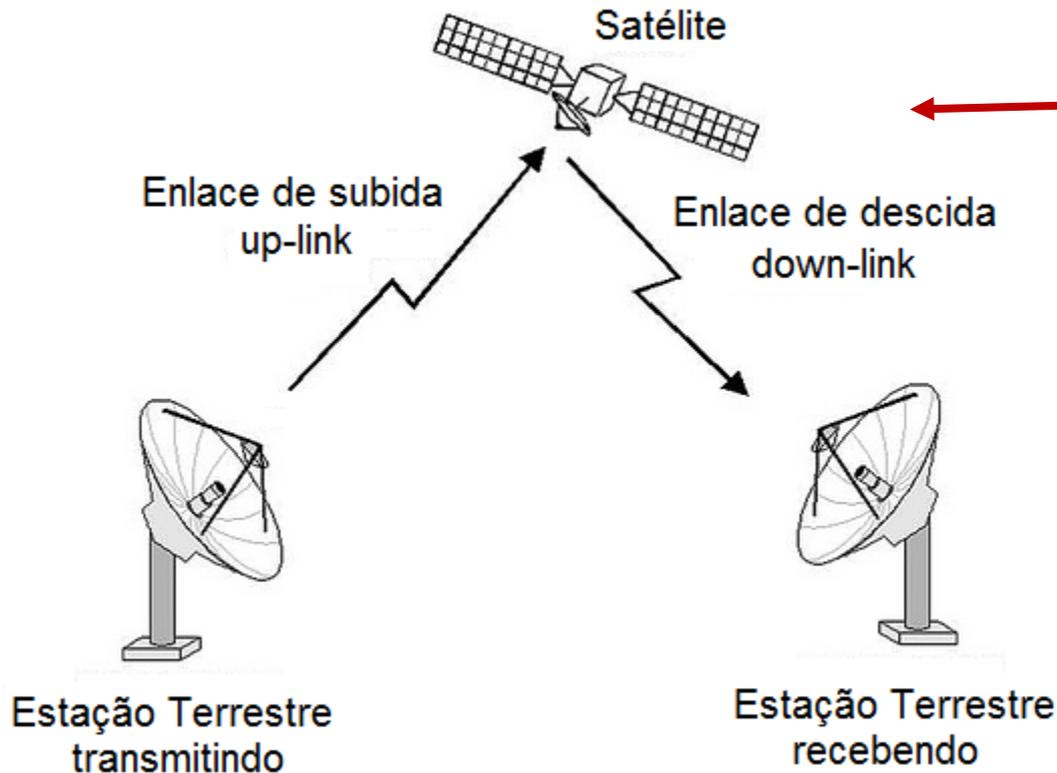
Faixas de frequência	Aplicação
1.575,42 MHz (L1) 1.227,60 MHz (L2)	GPS – Global Positioning System - uso civil e militar
10,7 – 12,7 GHz downlink	Recepção direta de TV via satélite
5,9 – 6,4 GHz uplink 3,7 – 4,2 GHz downlink	Comunicação via satélite Banda C ¹
14,0 – 14,5 GHz uplink 10,7 – 12,7 GHz downlink	Comunicação via satélite Banda Ku

¹Serviço a ser desativado por conflito com banda de 5G de 3,5 GHz

Uplink: Estação terrestre → Satélite

Downlink: Satélite → Estação terrestre

Comunicação via Satélite



Satélite

- receptor
- transmissor
- antenas
- painéis solares

Comunicação intercontinental

Satélites geoestacionários

$H \cong 36.000 \text{ km}$

Estações terrestres

- receptor, transmissor e antena

Satélite de Órbita Baixa – 500 a 2.000 km



Atividade

Acesse o site:
<https://spaceaware.io/>

Rastreie satélites artificiais orbitando a Terra

Identifique satélites artificiais ativos

Identifique satélites desativados, destroços,
partes foguetes de lançamento

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/Radar 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

¹**RFID** – *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

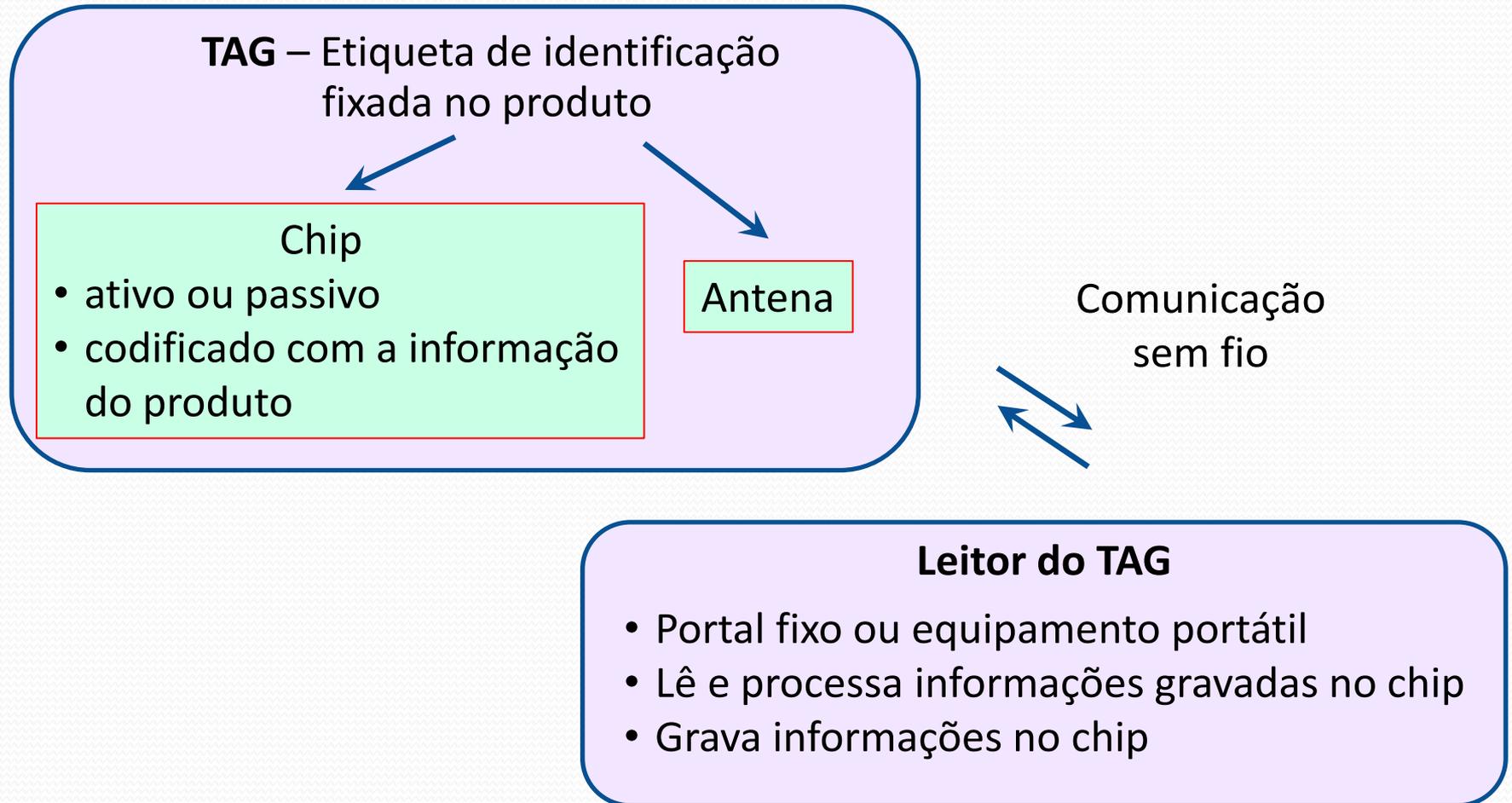
Aplicações em frequências ISM

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
 - Tornozeleira eletrônica

Aplicações em frequências ISM

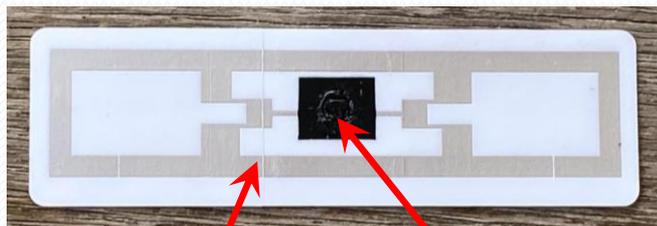
RFID - Identificação por meio de rádio frequência



Aplicações em frequências ISM

RFID - Identificação por meio de rádio frequência
Sistema de pedágio eletrônico

Etiqueta (tag) de RFID



Antena Chip



Tag de RFID no para-brisa do carro



RFID - Identificação por meio de rádio frequência

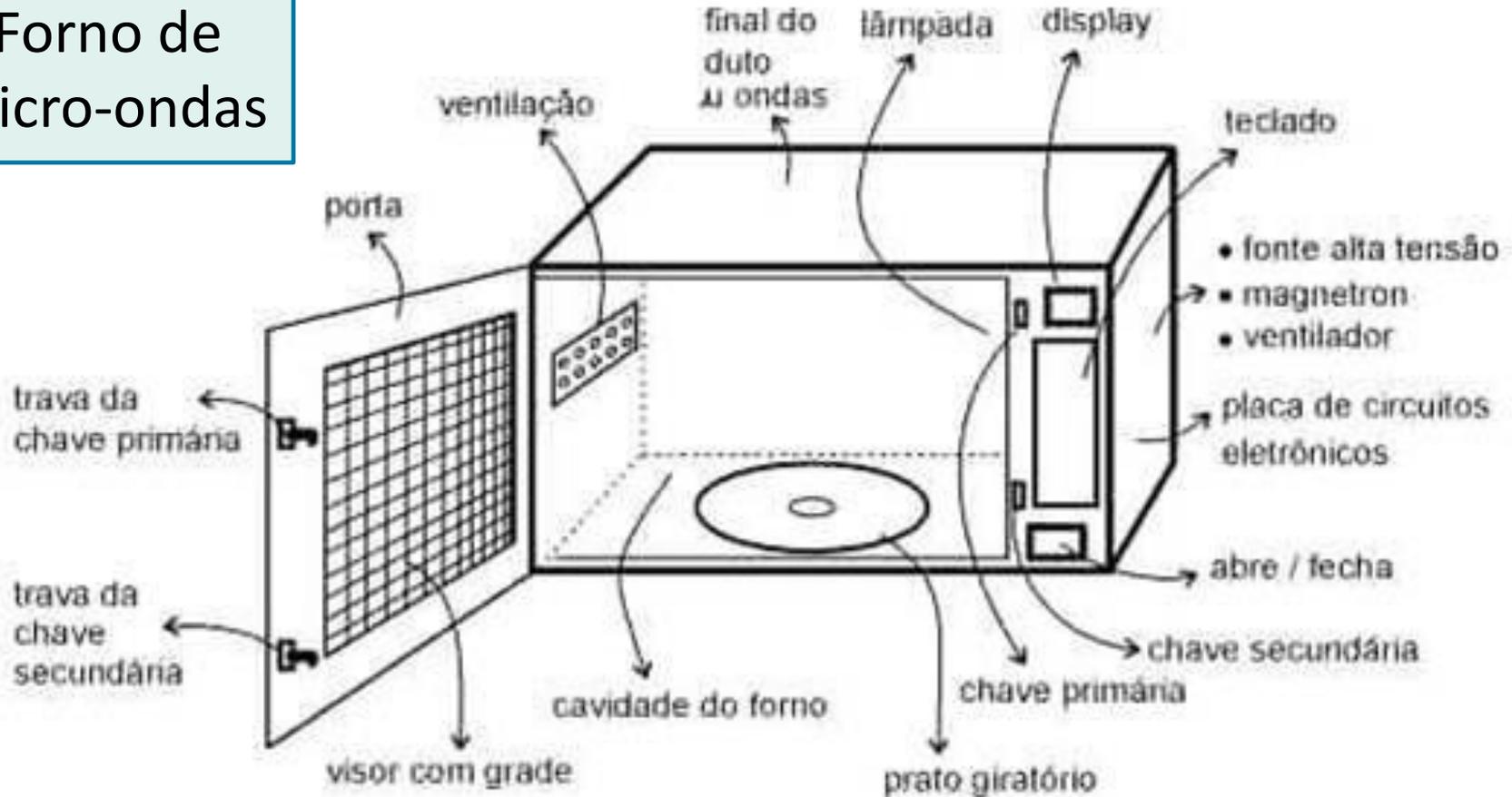
Sistema de pedágio eletrônico “free flow” – sem cancela

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



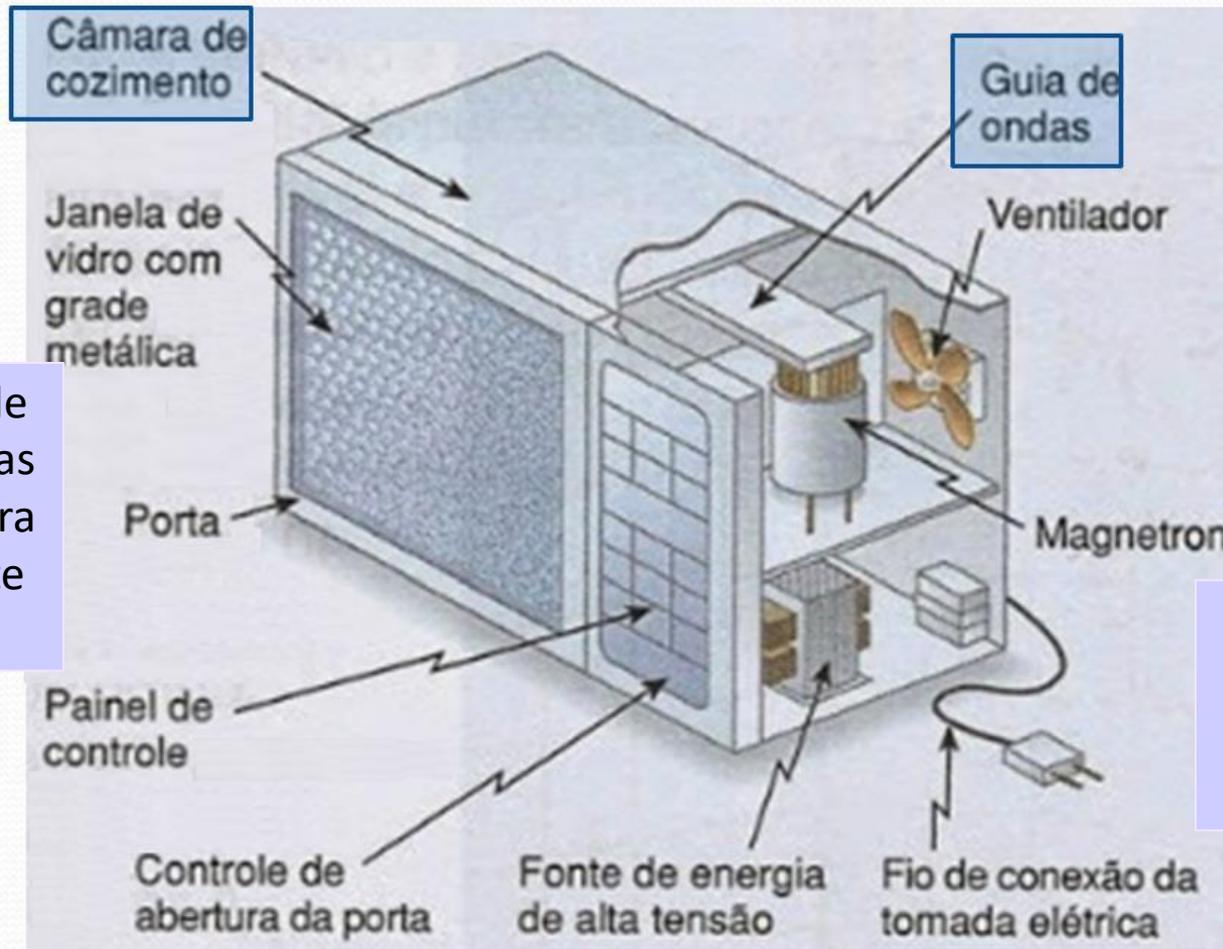
Aplicações em frequências ISM

Forno de micro-ondas



Aplicações em frequências ISM

Forno de micro-ondas



Potência de micro-ondas radiada para o ambiente < 1 W

Válvula Magnetron
700 W a 1 kW
Em 2,45 GHz

Vantagens de usar micro-ondas

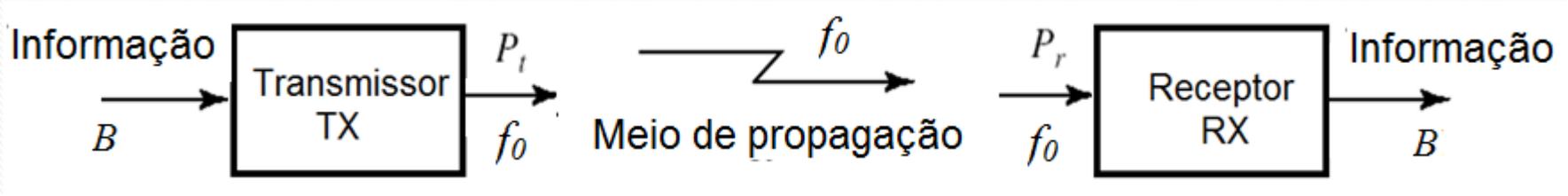
- Espectro de RF → 30 kHz até 300 MHz
 - Já está bastante ocupado
 - Novos sistemas de comunicação precisam de novas frequências
- Faixa de micro-ondas → 300 MHz a 300 GHz
 - Aproximadamente 300 GHz de banda
 - Comporta inúmeras portadoras
 - Comporta inúmeros novos serviços

Vantagens de usar micro-ondas

- Antenas de micro-ondas associam
 - Alto ganho → Feixe estreito
 - 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

- Sistema de comunicação



- Informação ou banda base
 - Voz, imagem ou dados
 - Banda B (Hz)
- Frequência portadora f_0 na faixa de micro-ondas
 - 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

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

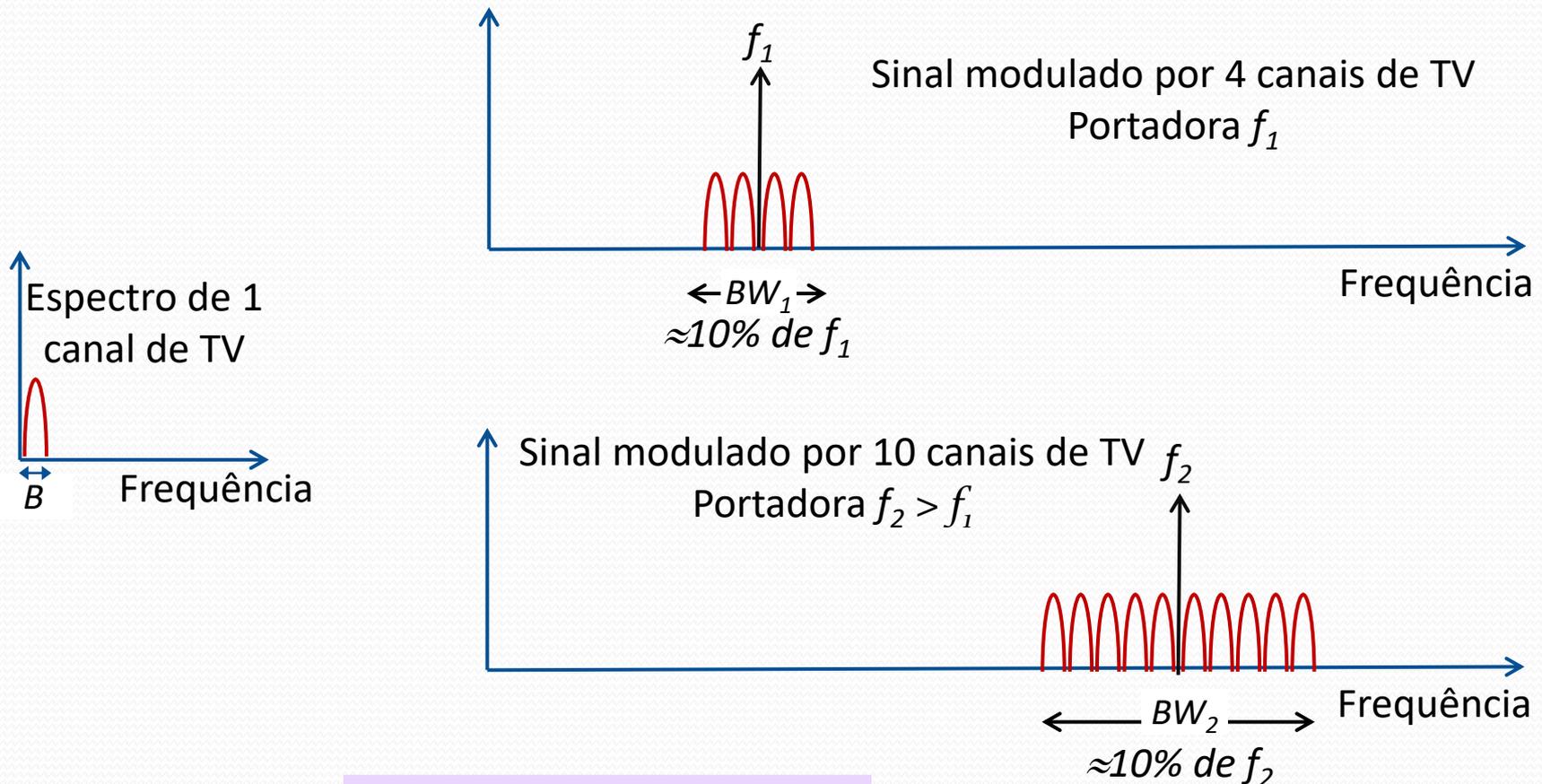
$\rightarrow 10$ canais de TV

Sistema operando em 6 GHz

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

$\rightarrow 100$ canais de TV

Vantagens de usar micro-ondas

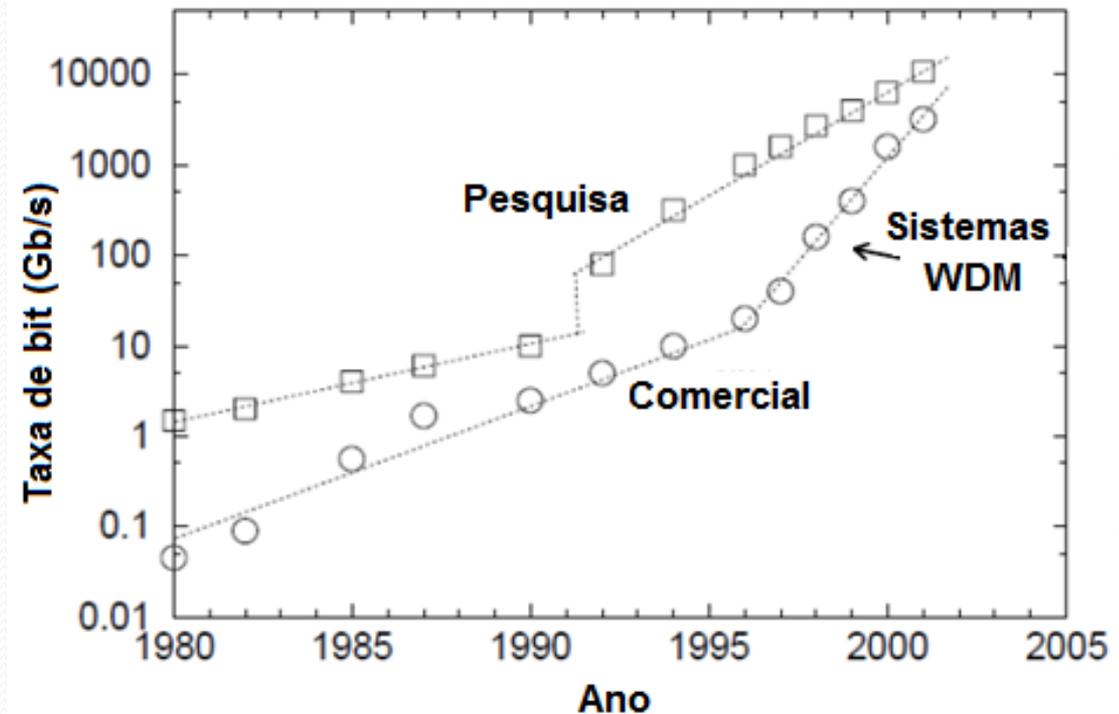


$$f_2 > f_1 \rightarrow BW_2 > BW_1$$

Vantagens de usar comunicação por fibras ópticas

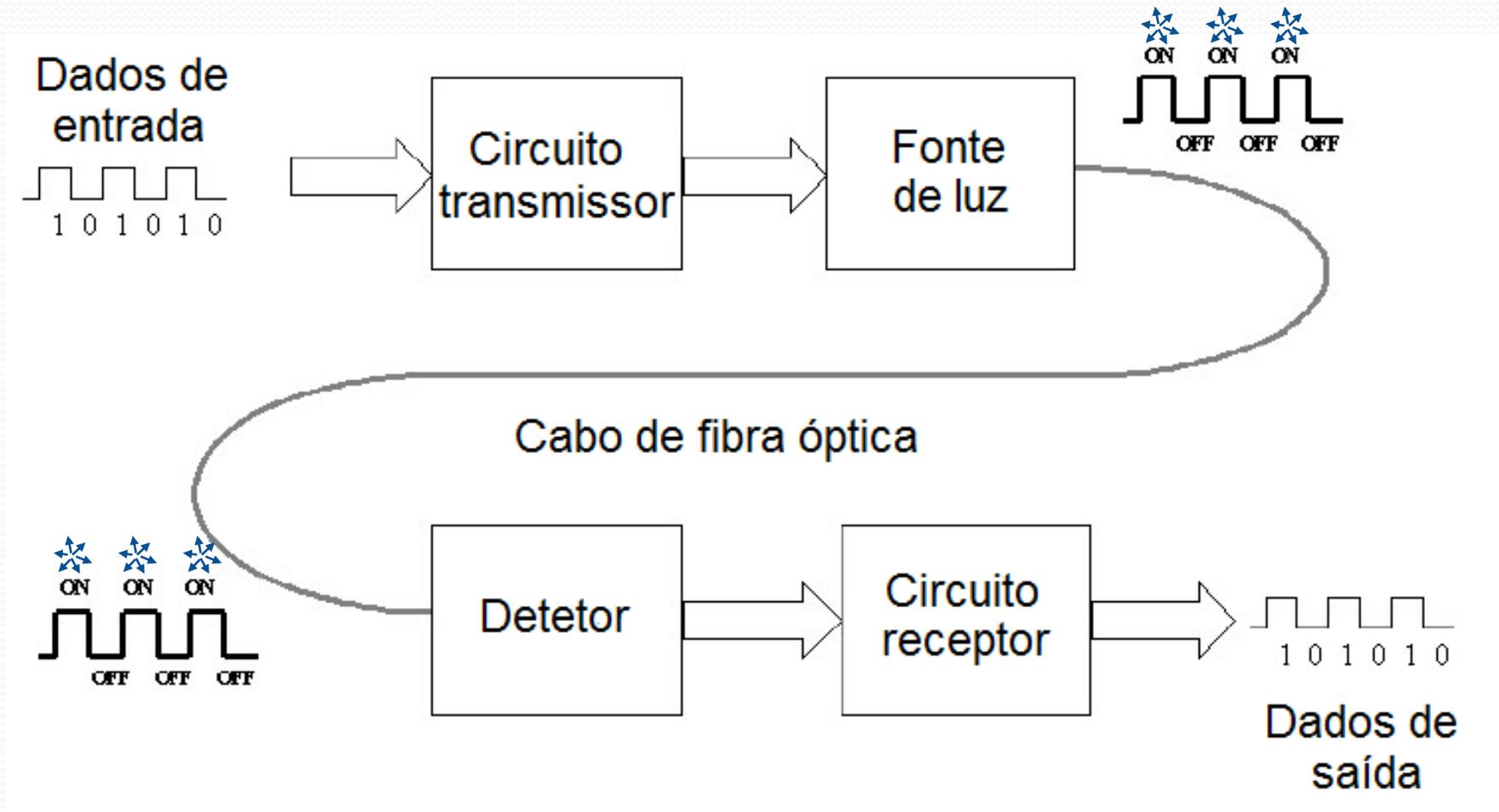
- Ondas EM na faixa de luz
 - Banda mais largas
 - Altas taxas de transmissão
- Transmissão a longas distâncias com baixas perdas (0,1 dB/km)
- Imunidade a interferência eletromagnética

Desempenho de sistemas ópticos a partir de 1980



Na USP – link de fibra óptica da FAPESP – 1 Gb/s

Sistemas de comunicações por fibra óptica

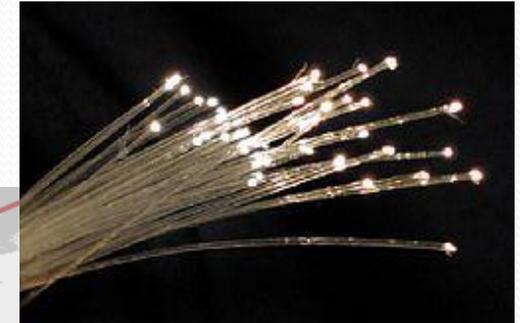


Sistemas de comunicações por fibra óptica

- Fibras ópticas multimodo
 - Aplicações de curta distância, que exigem baixo custo
 - Distribuição de TV de alta definição para assinantes
 - Distribuição de Internet com taxas de 300 Mb/s (2019)
- Fibras ópticas monomodo
 - Transmissão de dados, voz e imagem a longa distância
 - Transmissão de altas taxas de bits
 - Sistemas DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*,
 - Usa vários comprimentos de onda, com taxas de Tb/s

Exemplo de Sistema Óptico

- Comunicação intercontinental
- Cabos submarinos de fibra óptica



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 ⇒ baixos níveis de potência (Ex.: formação de cadeias de células no sangue)

Níveis Seguros de Radiação

- Normas internacionais
 - Limite de densidade de potência para exposição contínua segura
ou
 - 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

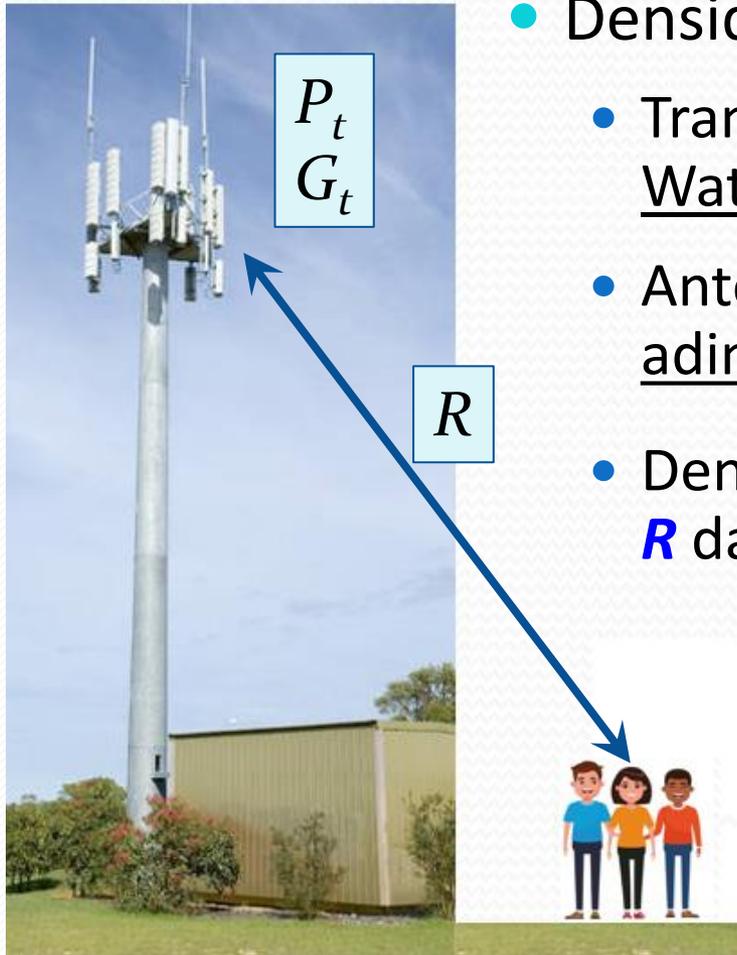
Efeitos biológicos de radiação por RF e micro-ondas é um tema cujo estudo está em andamento.

Níveis Seguros de Radiação

- Níveis seguros de radiação
 - Dependem da frequência
 - Expressos em densidade de potência
 $(\text{potência})/(\text{área}) \Rightarrow \text{mW/cm}^2$
 - 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



- Densidade média de potência, S_{AV}
 - Transmissor com potência de saída P_t em Watts
 - Antena de transmissão com ganho adimensional G_t
 - Densidade média de potência à distância R da antena de transmissão

$$S_{AV} = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi \cdot R^2}$$

- Unidade de SAV \rightarrow (potência)/(área)
- Por exemplo, mW/cm²

Níveis Seguros de Radiação

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

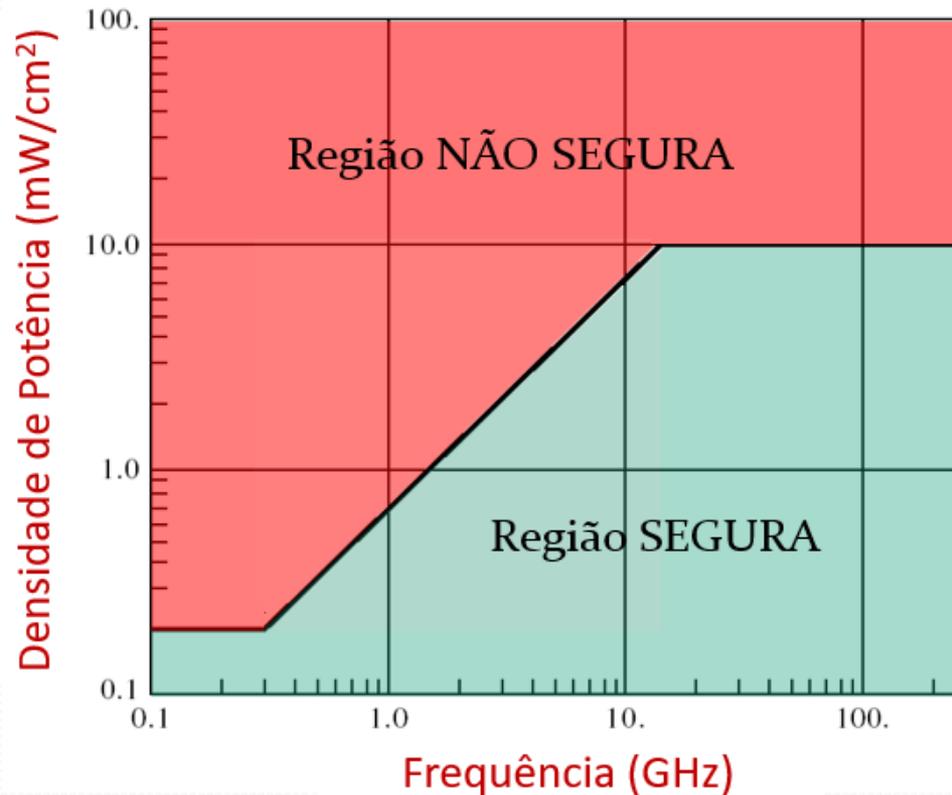
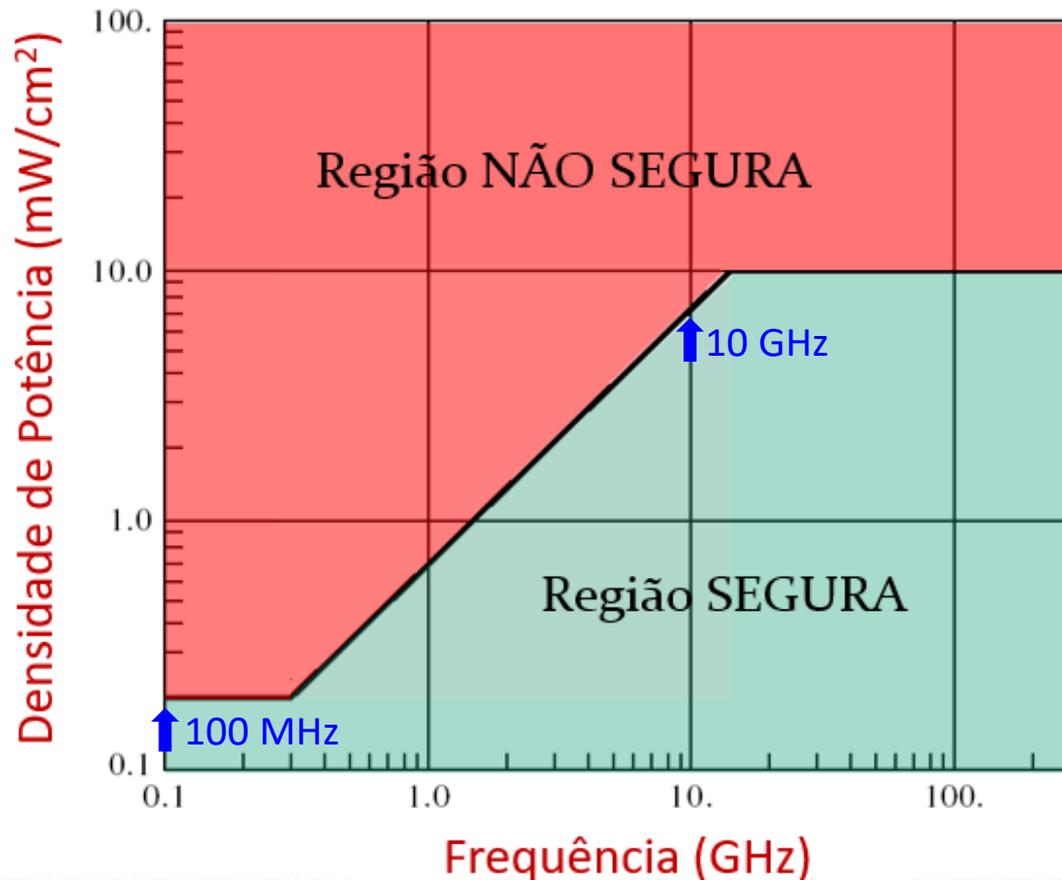


Figura 13.29, *Microwave Engineering*, David M. Pozar

Níveis Seguros de Radiação

DESAFIO – resposta no CHAT



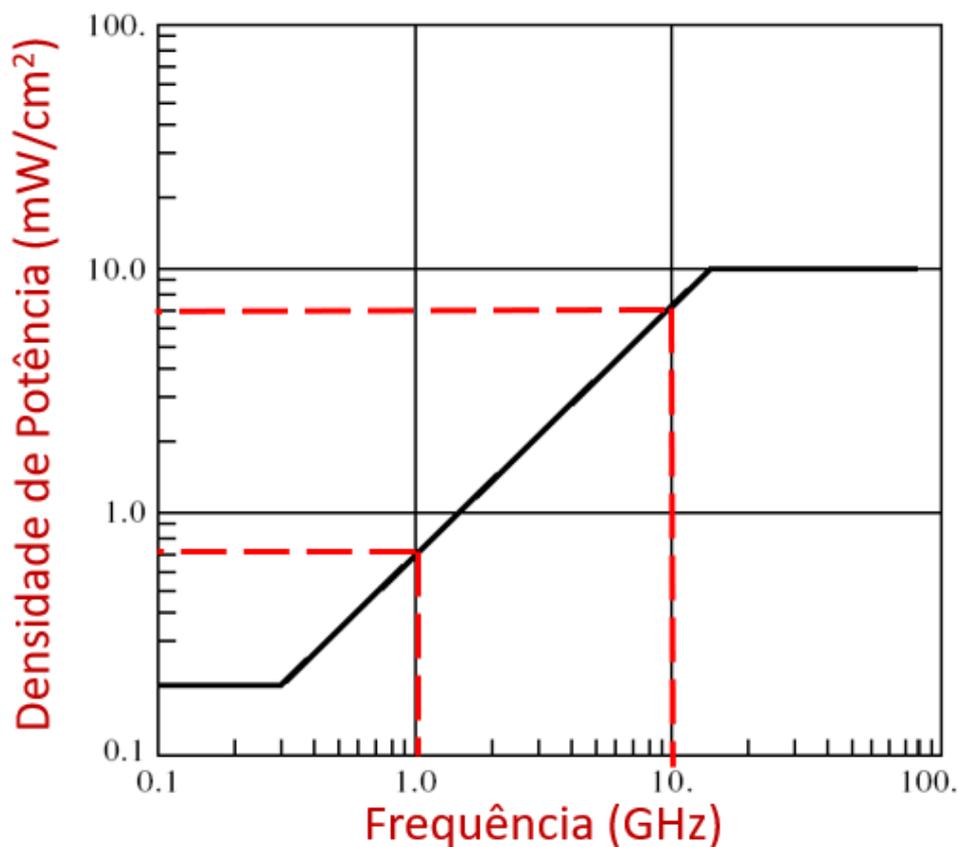
Observando o gráfico, responda:

Em que frequência a exposição a radiação EM traz maior risco: 100 MHz ou 10 GHz?

Por que isso ocorre?

Níveis Seguros de Radiação

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

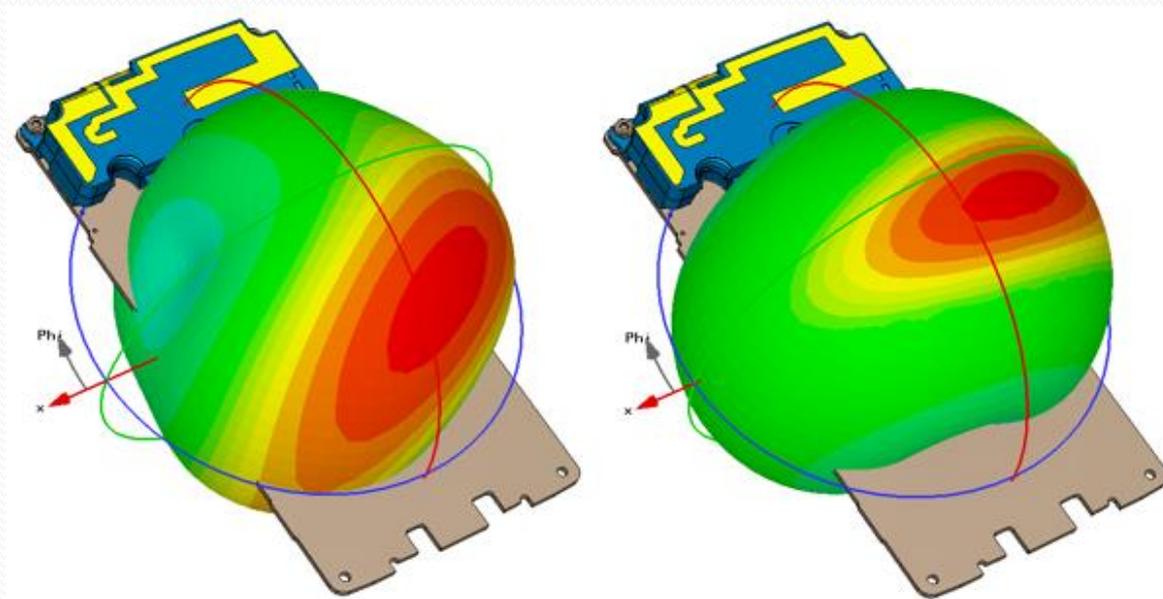


Frequência	Níveis seguros de radiação
0,1 a 0,3 GHz	≤ 0,2 mW/cm ²
1 GHz	≤ 0,7 mW/cm ²
10 GHz	≤ 7 mW/cm ²

Níveis Seguros de Radiação

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

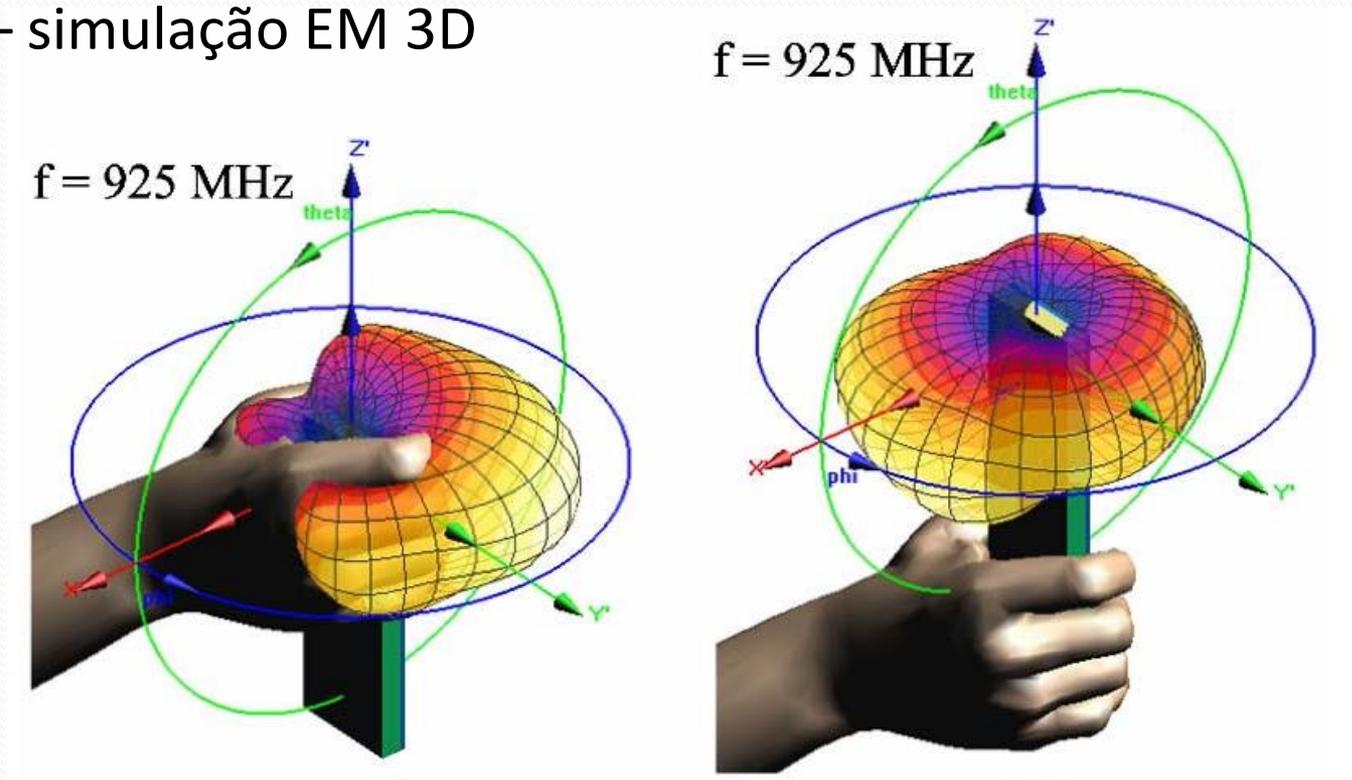
Diagrama de radiação da antena do telefone celular na banda GSM– simulação EM 3D



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

Níveis Seguros de Radiação

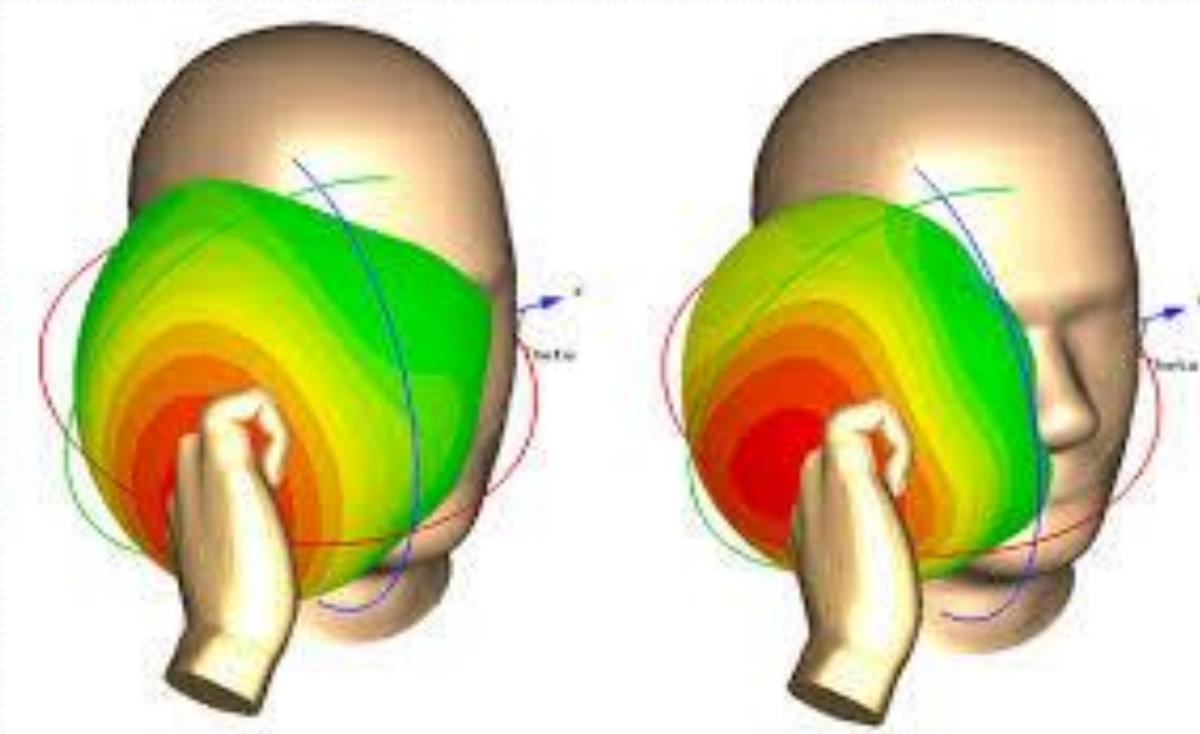
Efeito da mão sobre o diagrama de radiação da antena do telefone celular – simulação EM 3D



Efeitos da mão do usuário na antena de celular GSM /DCS interna da EMC
Chih-Ming Su , Chih-hsien Wu , K. Wong , Shih-Huang Yeh , Chia-Lun Tang

Níveis Seguros de Radiação

Diagrama de radiação da antena do telefone celular na banda GSM próximo da cabeça do usuário – simulação EM 3D



EVITE exposição prolongada.

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



UNIDADES DE FREQUÊNCIA, GANHO E POTÊNCIA

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

Micro-ondas

Unidades de comprimento

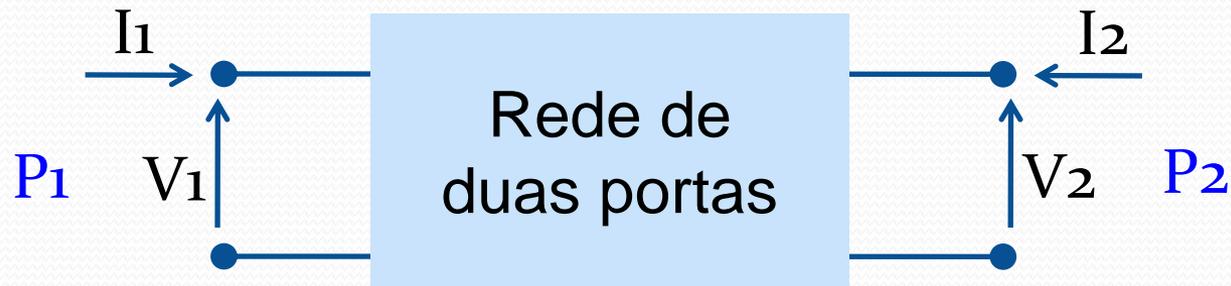
Unidade	Equivalência
1 mm	10^{-3} m
1 μ m	10^{-6} m
1 nm	10^{-9} m

Óptica

Unidades

- Decibéis
 - Unidade logarítmica relativa
 - Usada para expressar
 - Ganho de tensão → dB
 - Ganho de corrente → dB
 - Ganho de potência → dB
 - Potência → dBm e dBW

Unidades



- Rede de duas portas, com

V_1 tensão de entrada

V_2 tensão de saída

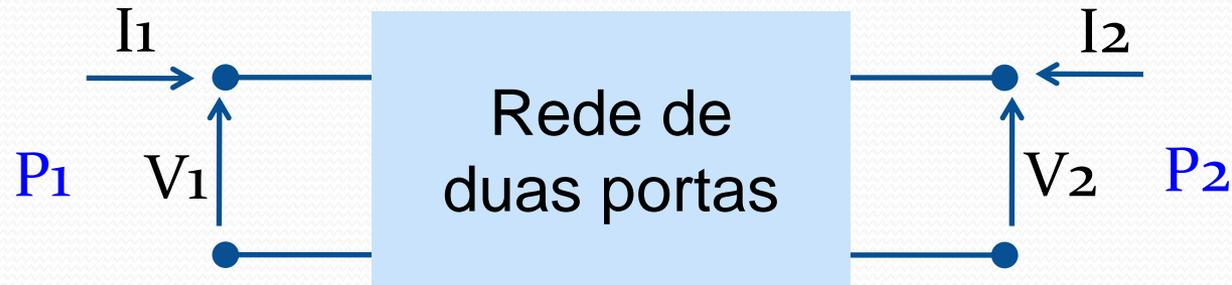
I_1 corrente de entrada

I_2 corrente de saída

P_1 potência de entrada

P_2 potência de saída

Unidades



Unidade	Ganho de potência	Ganho de tensão	Ganho de corrente
Adimensional	$G_p = \frac{P_2}{P_1}$	$G_V = \frac{V_2}{V_1}$	$G_I = \frac{I_2}{I_1}$
Decibéis	$G_p(dB) = 10 \cdot \log \frac{P_2}{P_1}$	$G_V(dB) = 20 \cdot \log \frac{V_2}{V_1}$	$G_I(dB) = 20 \cdot \log \frac{I_2}{I_1}$

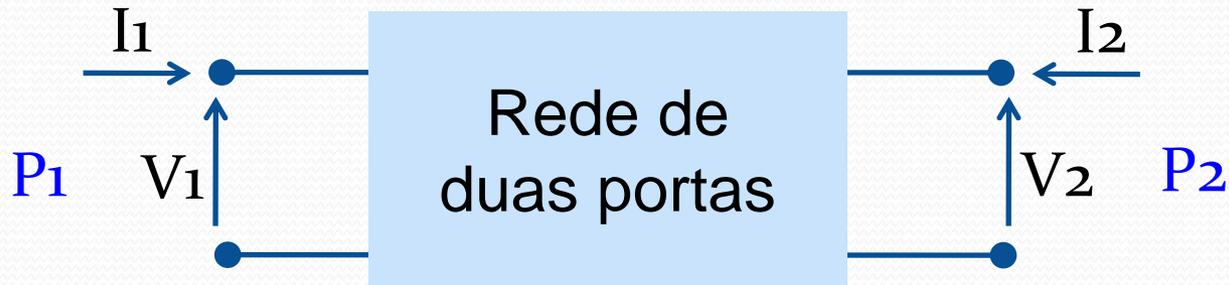
Ganho de potência

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

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

G_p (adimensional)	G_p (dB)
1	0
2	3
4	6
10	10
20	13
40	16
100	20
200	23
400	26
1000	30

Redes com perdas



Ganho de potência da rede com perdas

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

Ganho de potência da rede com perdas em dB

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

Redes com perdas

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

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

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

- Potência em decibéis

dBm → potência relativa a 1 mW

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

dBW → Potência relativa a 1 W

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

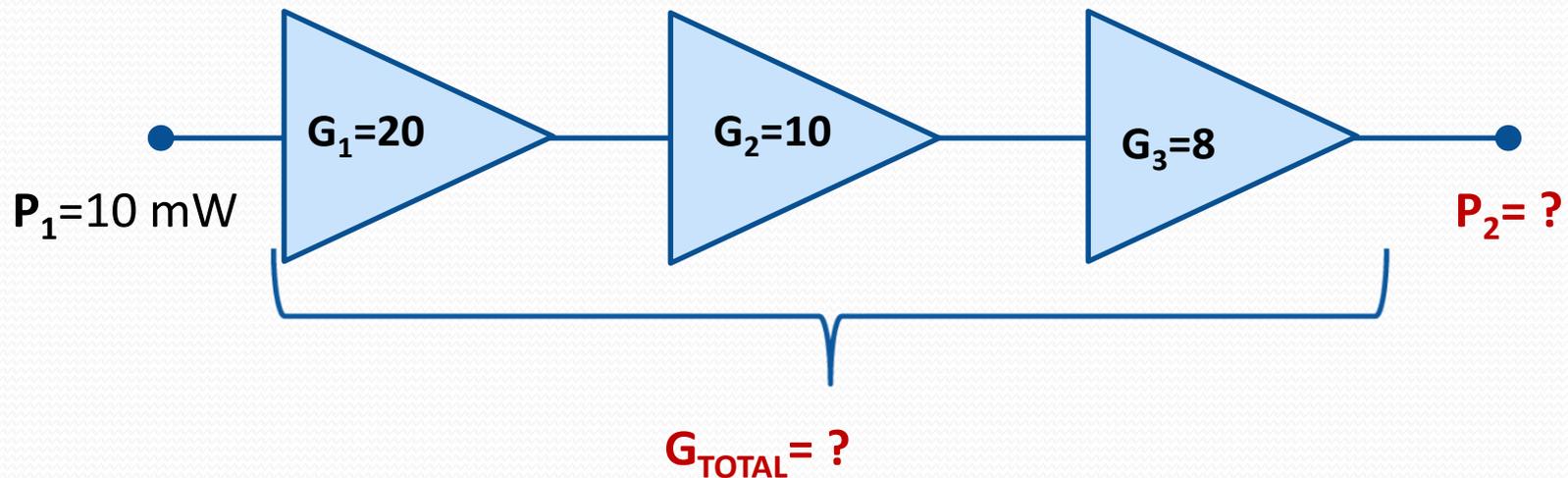
Potência

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

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

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

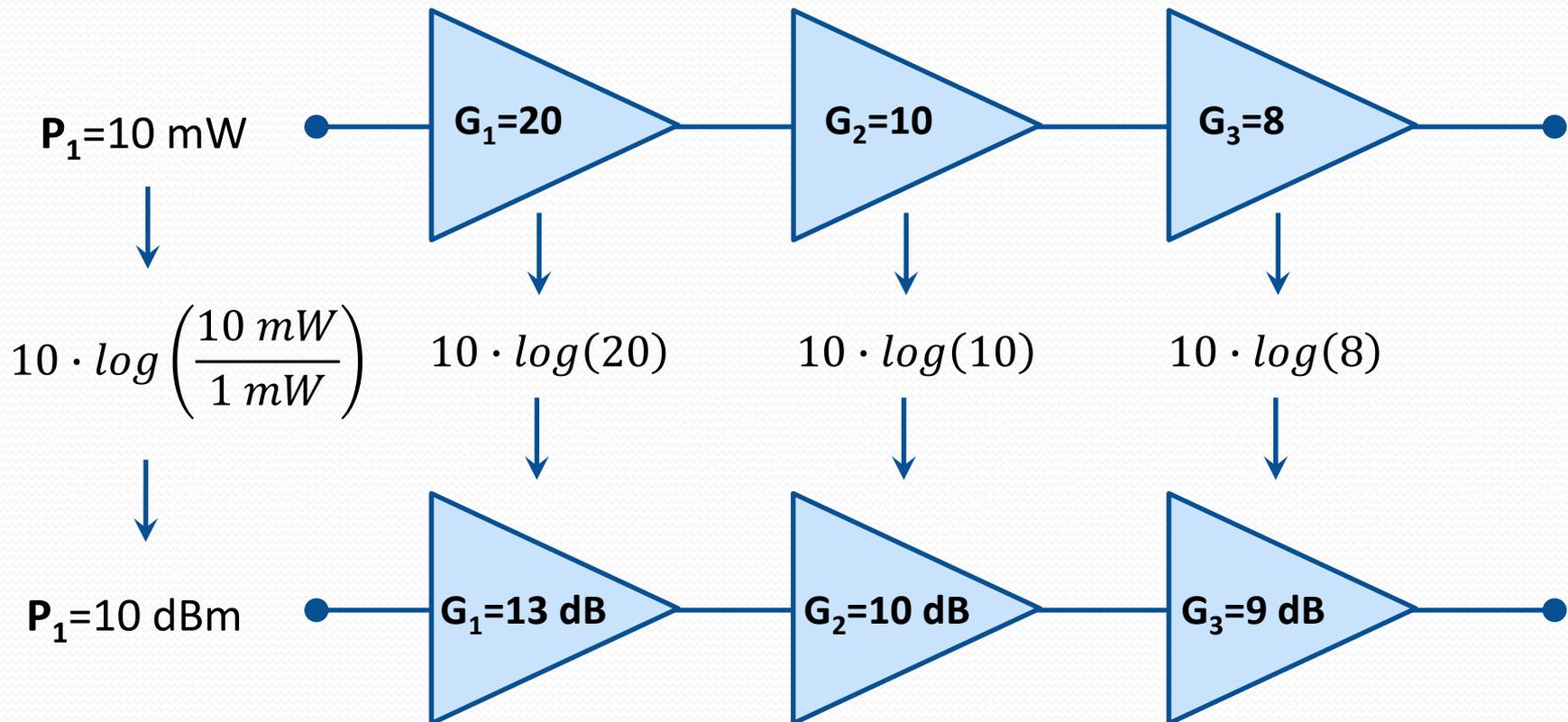
Cálculos de ganho e potência - adimensional



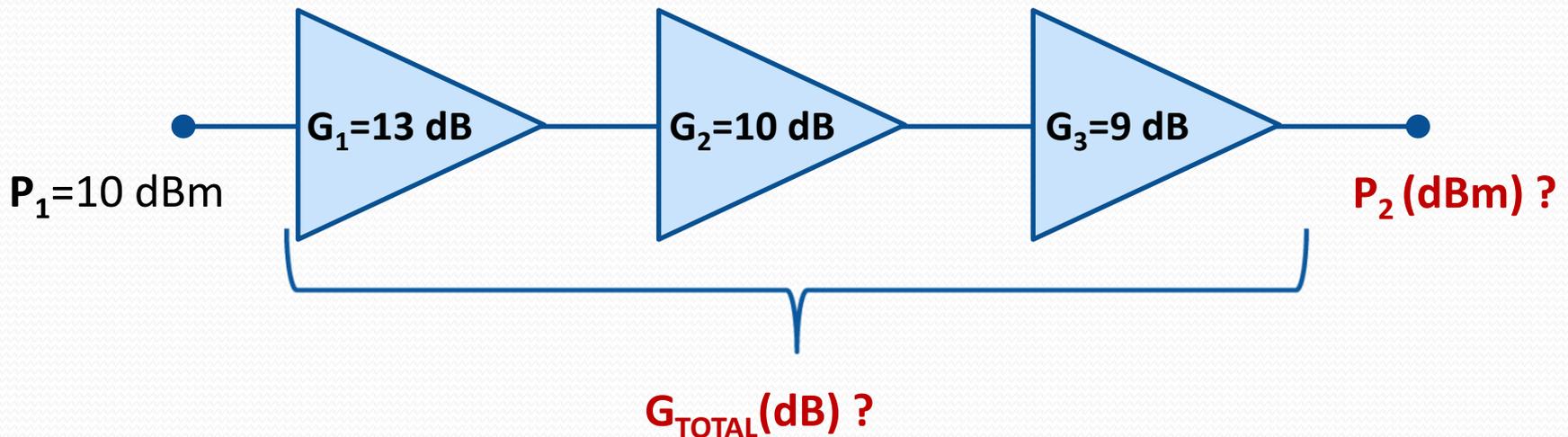
$$G_{TOTAL}(\text{adimensional}) = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 1.600$$

$$P_2(\text{mW}) = G_{TOTAL}(\text{adimensional}) \cdot P_1(\text{mW}) = 16.000 \text{ mW}$$

Cálculos de ganho e potência – em decibéis



Cálculos em decibéis de ganho e potência



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

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