

# INTRODUÇÃO

PSI3483

## ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM MEIOS GUIADOS

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> 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
  - 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 $\mu\text{m}$	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

\* $\lambda = c/f$  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

<b>Designação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Faixa de comprimentos de onda</b>
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

## 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 <sup>1,2</sup>
89 a 173 MHz	Estações de Rádio FM
174 a 216 MHz	Canais 7 a 13 de TV Analógica – VHF <sup>1,2</sup>
470 a 608 MHz	Canais 14 a 36 de TV Digital – UHF <sup>1</sup>
608 a 614 MHz	Radioastronomia
614 a 806 MHz	Canais 38 a 69 de TV Digital – UHF <sup>1</sup>

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

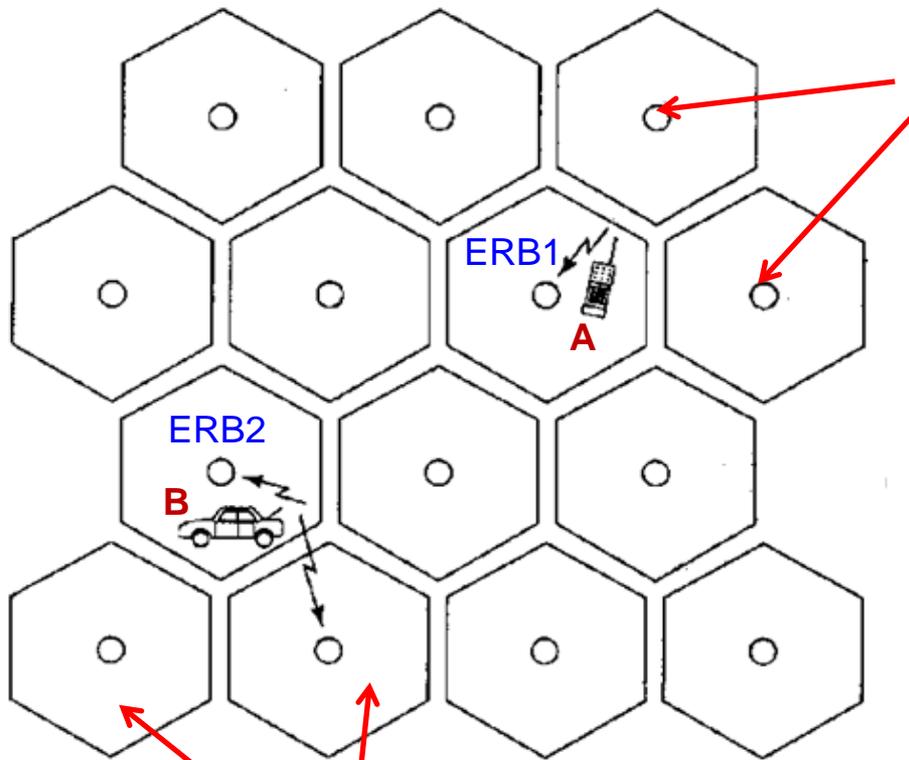
# Exemplos de Frequências Licenciadas

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



Área de cobertura celular



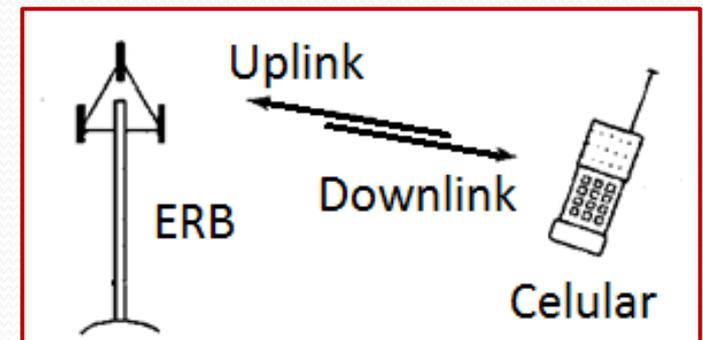
**ERB**

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



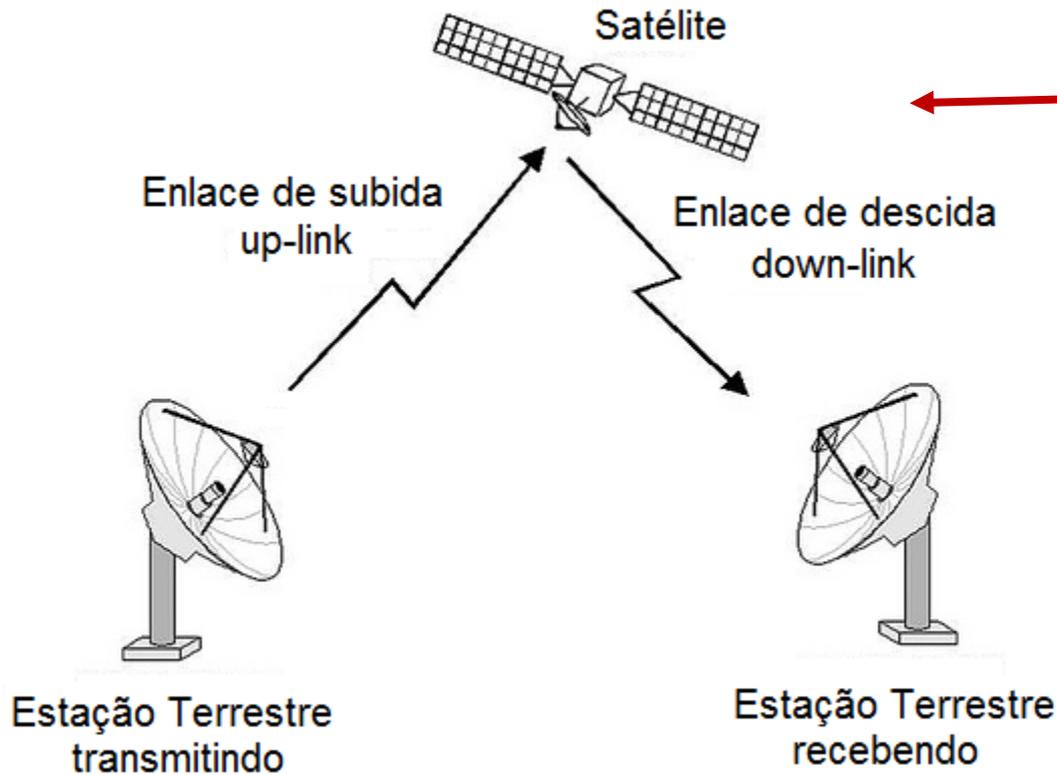
# Exemplos de Frequências Licenciadas

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

# 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



# 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 <sup>1</sup>
13,560 a 13,567 MHz	13,56 MHz	RF RFID <sup>1</sup>
26,957 a 27,283 MHz	27,12 MHz	VHF RFID <sup>1</sup>
40,66 a 40,70 MHz	40,68 MHz	
433,05 a 434,79 MHz	433,92 MHz	Controle remoto RF <sup>2</sup>
902 a 928 MHz	915 MHz	UHF RFID <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

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

TAG – Etiqueta de identificação  
fixada no produto

Antena

Chip

- ativo ou passivo
- codificado com a informação do produto

Comunicação  
sem fio

Leitor do TAG

- Portal fixo ou equipamento portátil
- Lê e processa informações gravadas no chip
- Grava informações no chip

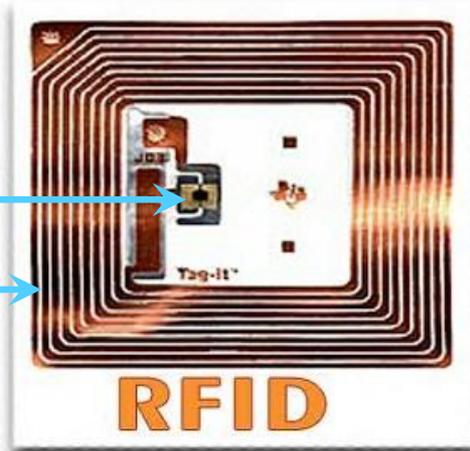
# Aplicações em frequências ISM

RFID - Identificação por meio de rádio frequência

TAG de RFID

Chip

Antena



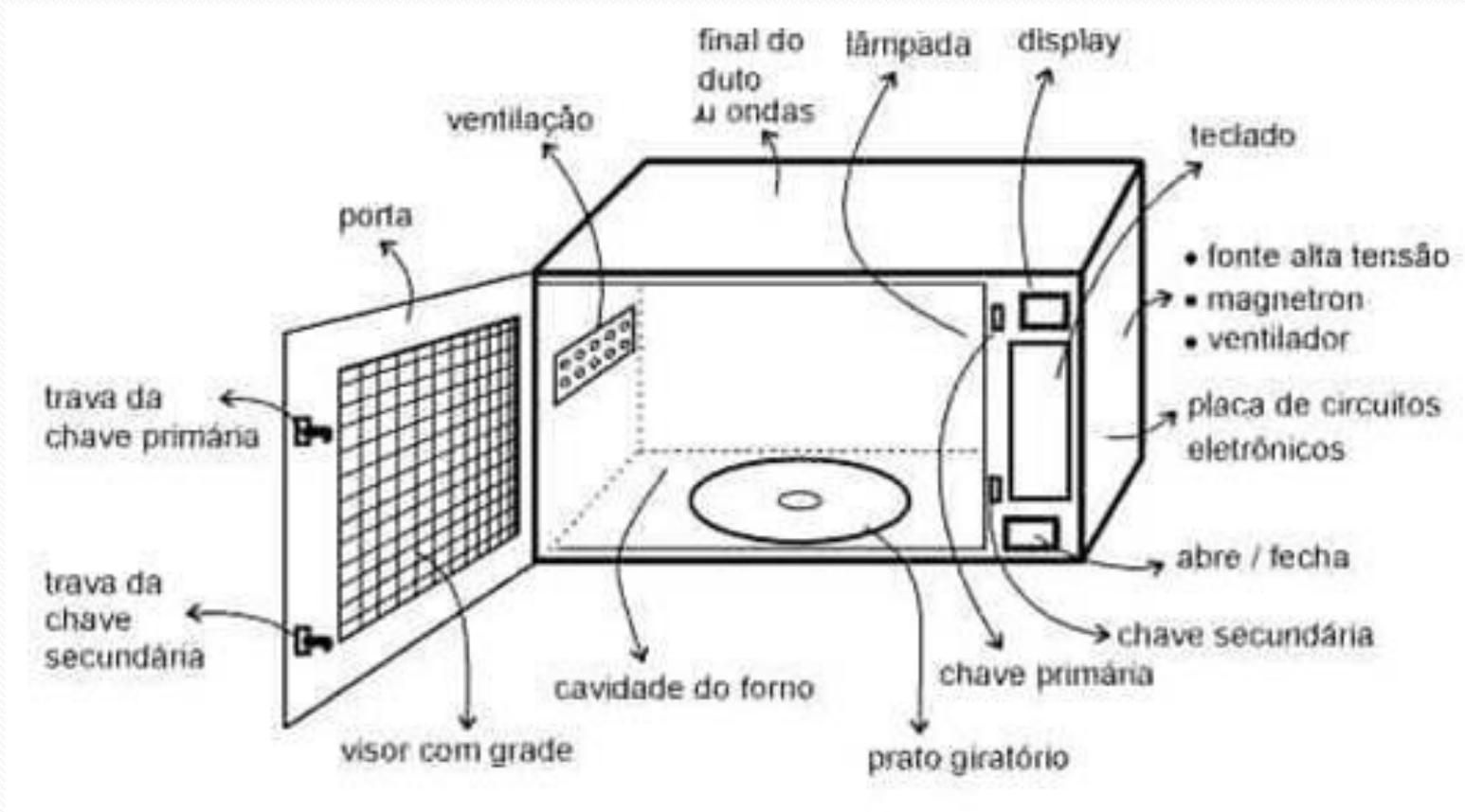
Sistema de pedágio eletrônico



TAG de pedágio eletrônico no vidro do carro

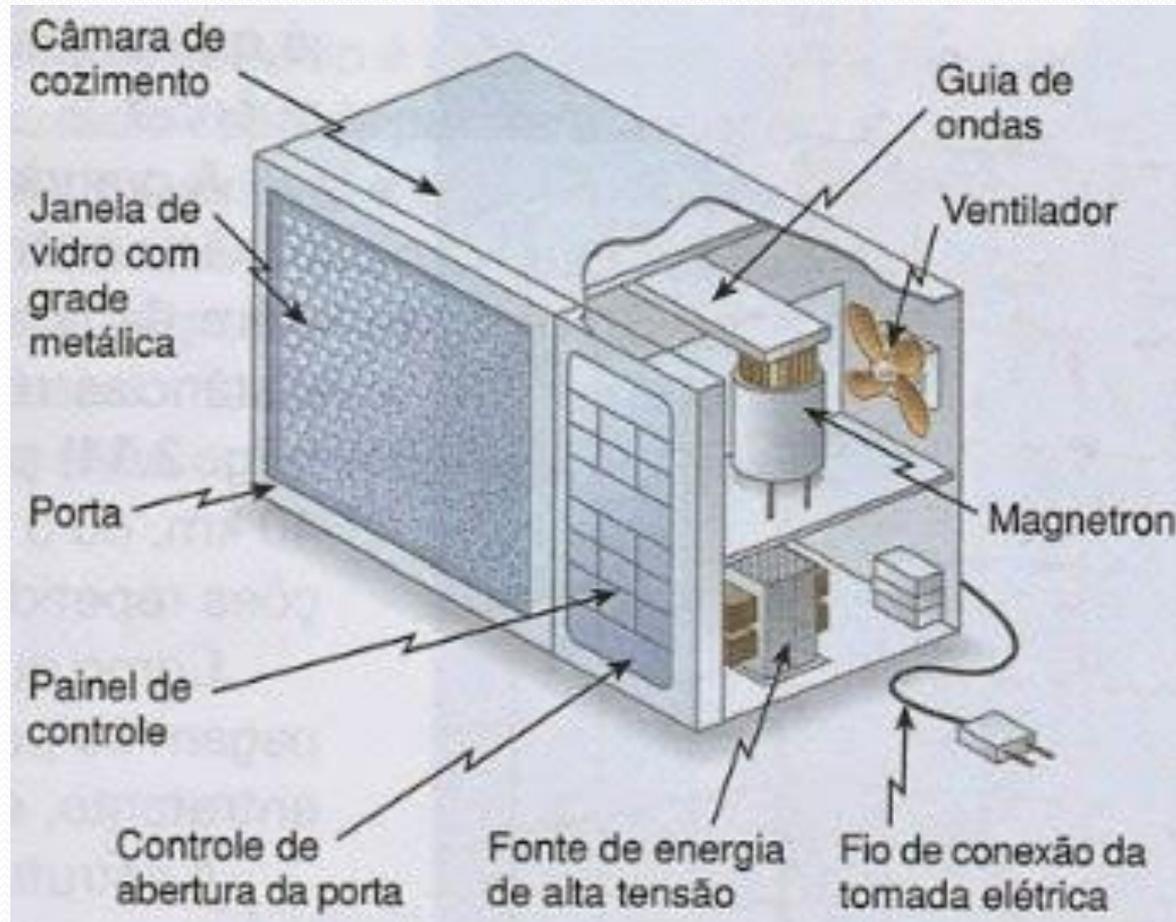
# Aplicações em frequências ISM

## Forno de micro-ondas



# Aplicações em frequências ISM

## Forno de micro-ondas



# Vantagens de usar micro-ondas

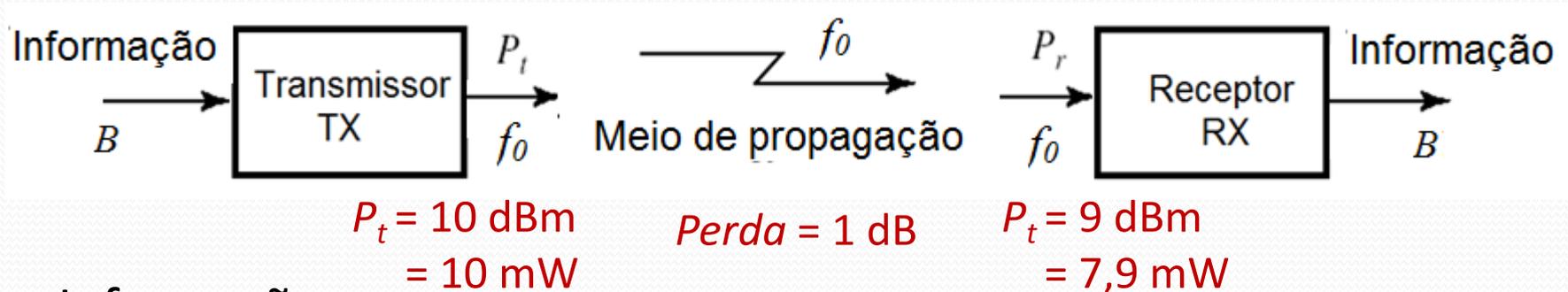
- Espectro de RF → 30 KHz até 300 MHz
  - Já está bastante ocupado
  - Novos sistemas de comunicação precisam de novas frequências
- Faixa de micro-ondas → 300 MHz a 300 GHz
  - Aproximadamente 300 GHz de banda
  - Comporta inúmeras portadoras
  - Comporta inúmeros novos serviços

# 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

- 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  $\approx 10\%$   
 $f_0$  <sup>?</sup>  $\rightarrow$  frequência portadora  
 $BW$  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**

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

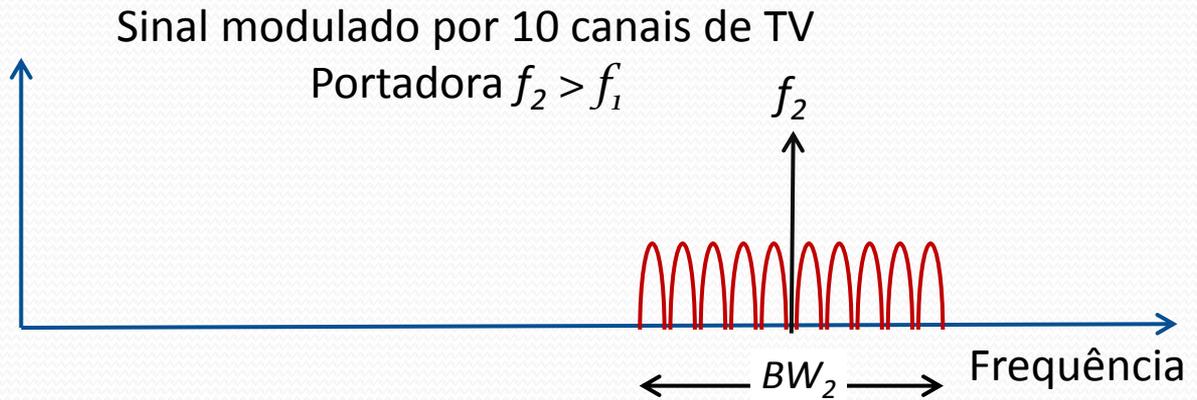
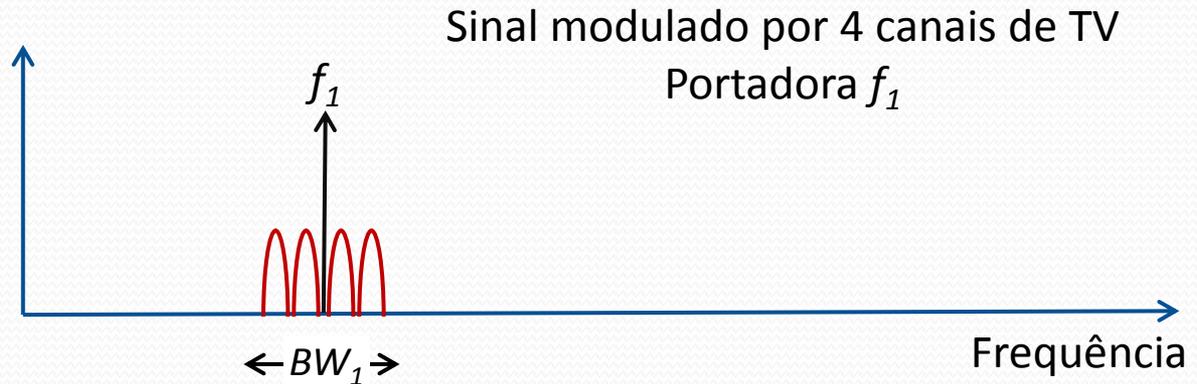
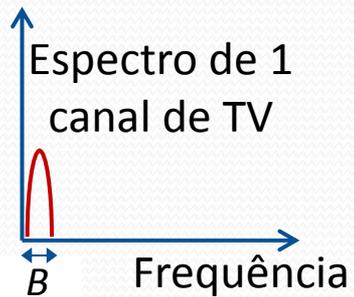
$\rightarrow 10$  canais de TV

**Sistema operando em 6 GHz**

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

$\rightarrow 100$  canais de TV

# Vantagens de usar micro-ondas

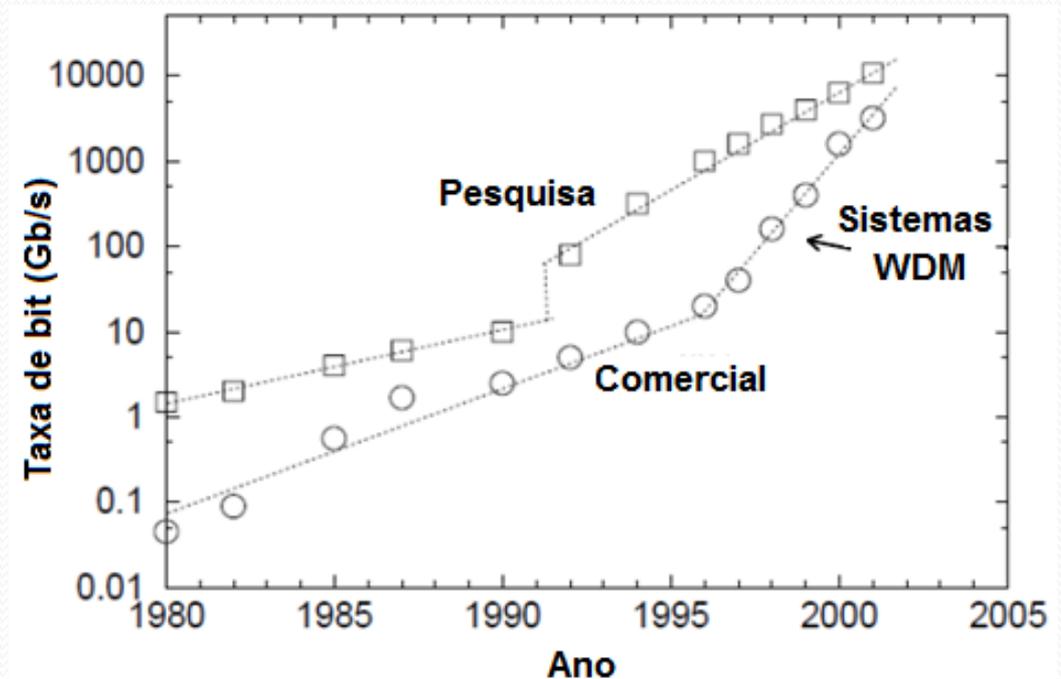


$$f_2 > f_1 \rightarrow BW_2 > BW_1$$

# Vantagens de usar comunicação por fibras ópticas

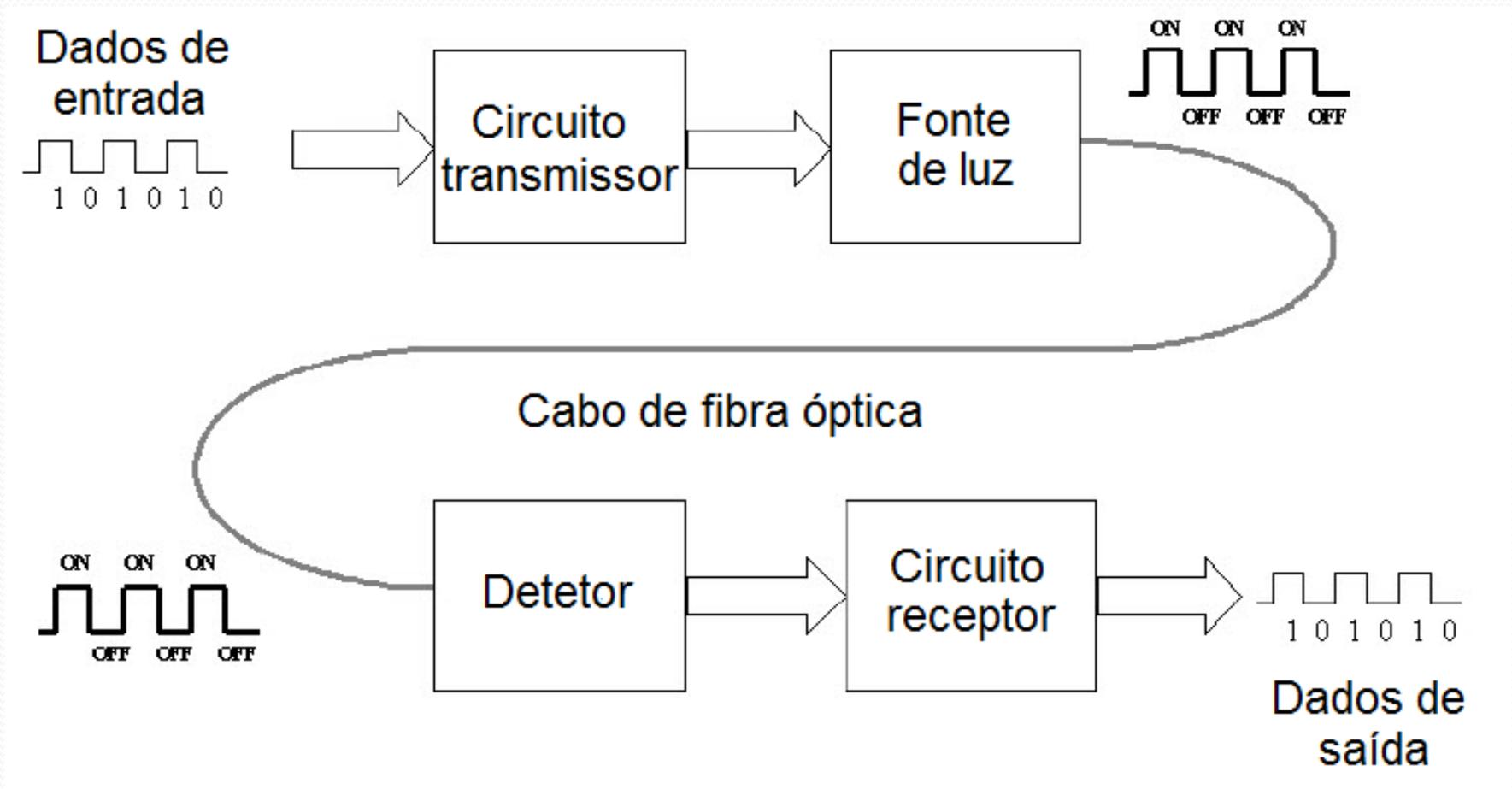
- Banda mais largas
- Altas taxas de transmissão
- Transmissão a longas distâncias com baixas perdas (0,1 dB/km)
- Imunidade a interferência eletromagnética

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

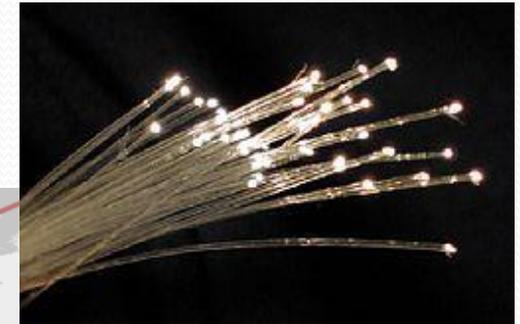


# Sistemas de comunicações por fibra óptica

- 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 200 Mb/s (2017)
- Fibras ópticas monomodo
  - Transmissão de dados, voz e imagem a longa distância
  - Transmissão de altas taxas de bits
  - Sistemas DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*, usando 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
  - 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  
 $(\text{potência})/(\text{área}) \Rightarrow \text{mW}/\text{cm}^2$
  - 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

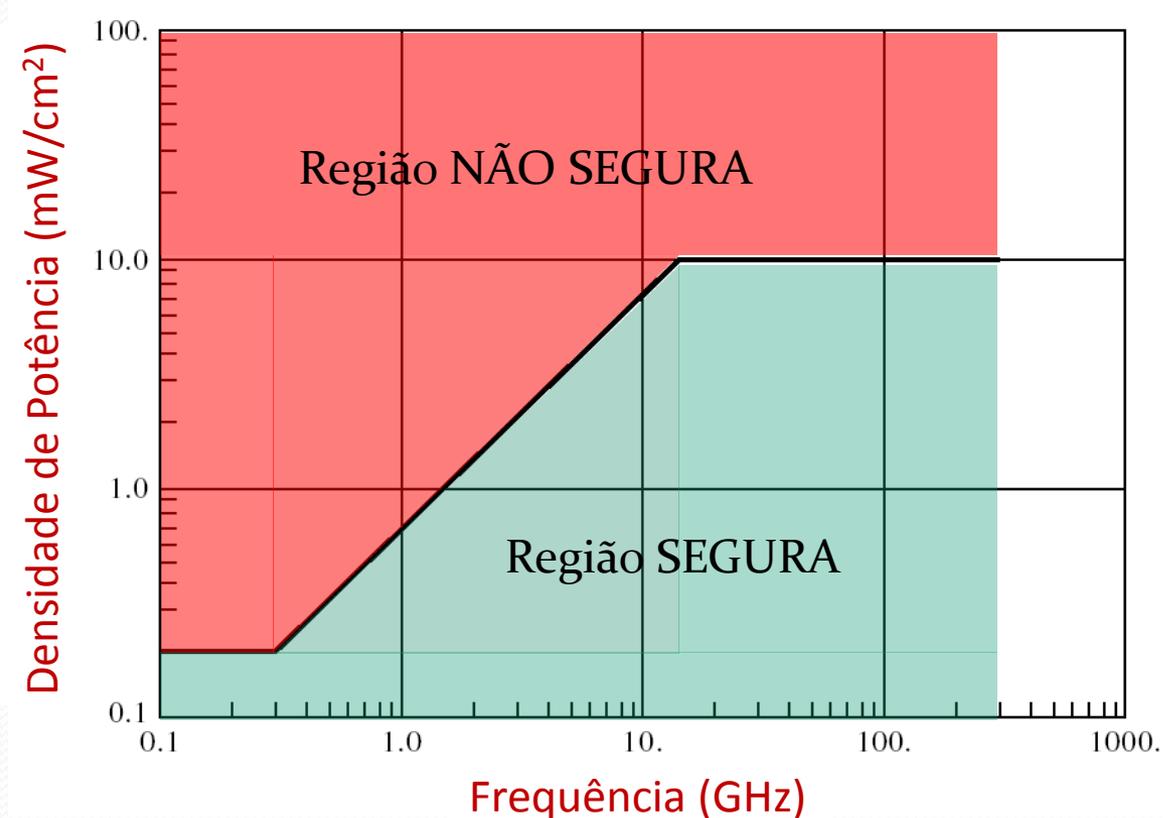
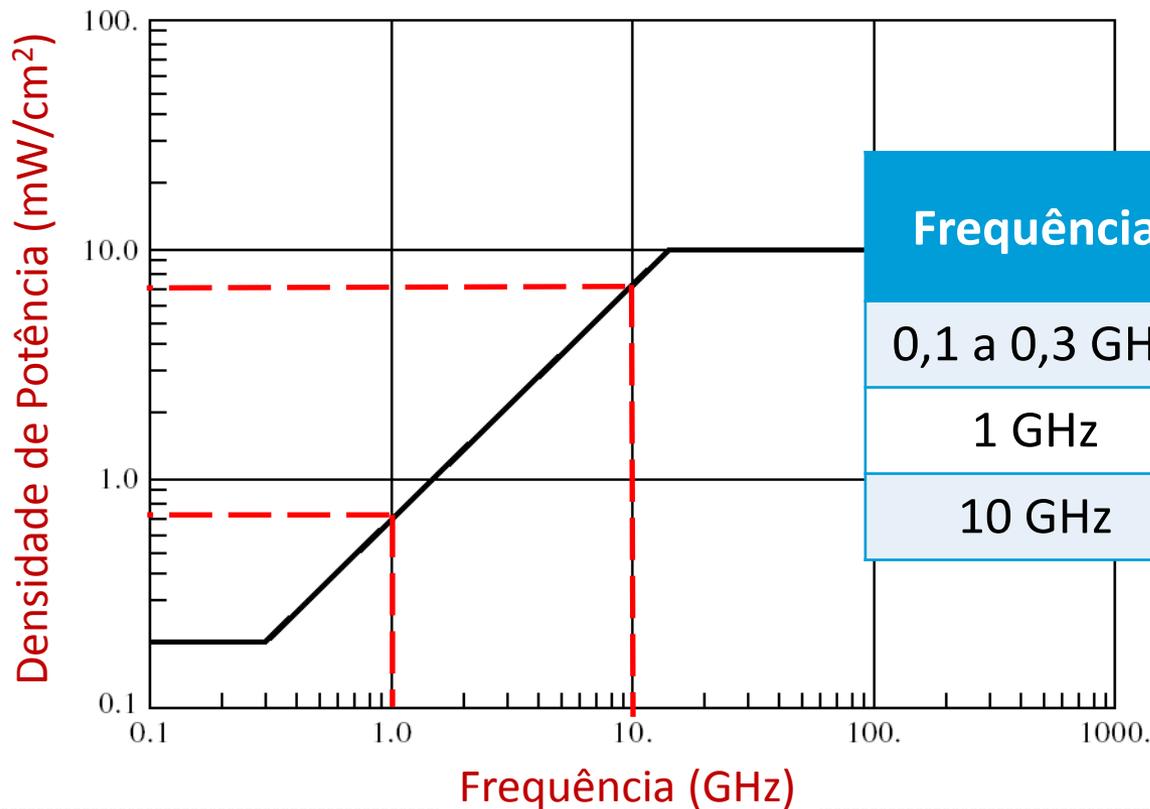


Figura 13.29, *Microwave Engineering*, David M. Pozar

# Níveis Seguros de Radiação

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



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	$\leq 7 \text{ mW/cm}^2$



# 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

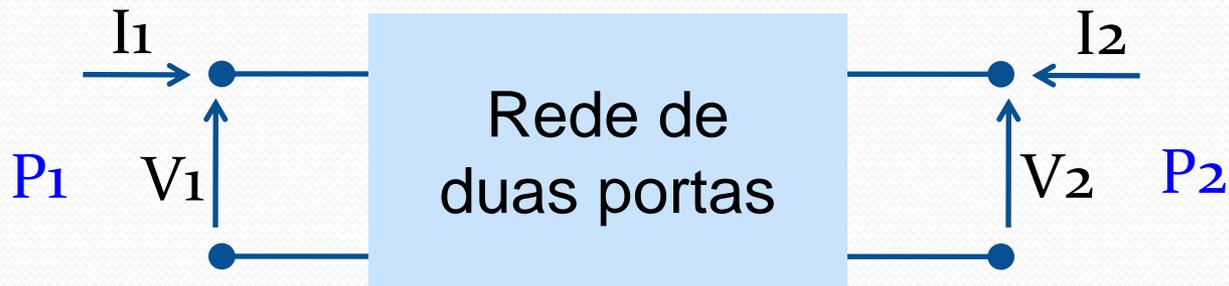
Unidade	Equivalência
1 mm	$10^{-3}$ m
1 $\mu$ m	$10^{-6}$ m
1 nm	$10^{-9}$ m

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

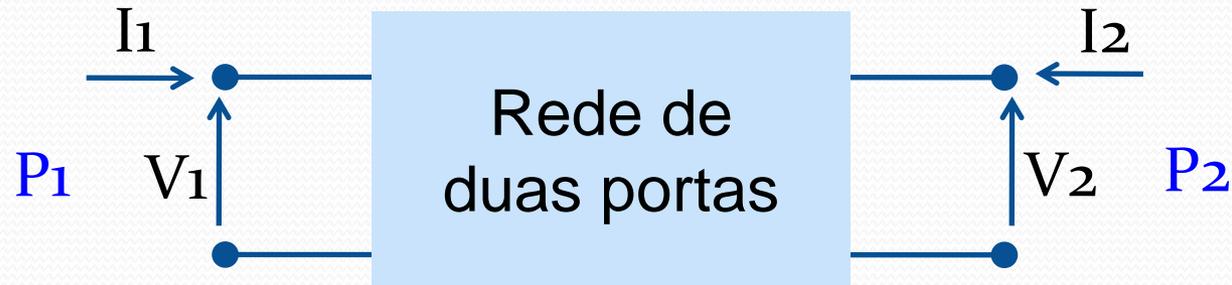
$I_1$  corrente de entrada

$I_2$  corrente de saída

$P_1$  potência de entrada

$P_2$  potência de saída

# Unidades



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

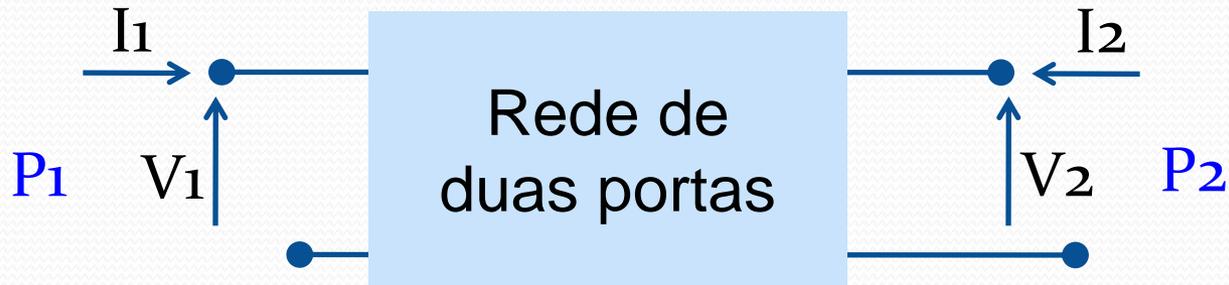
# Ganho de potência

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

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

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

# 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

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

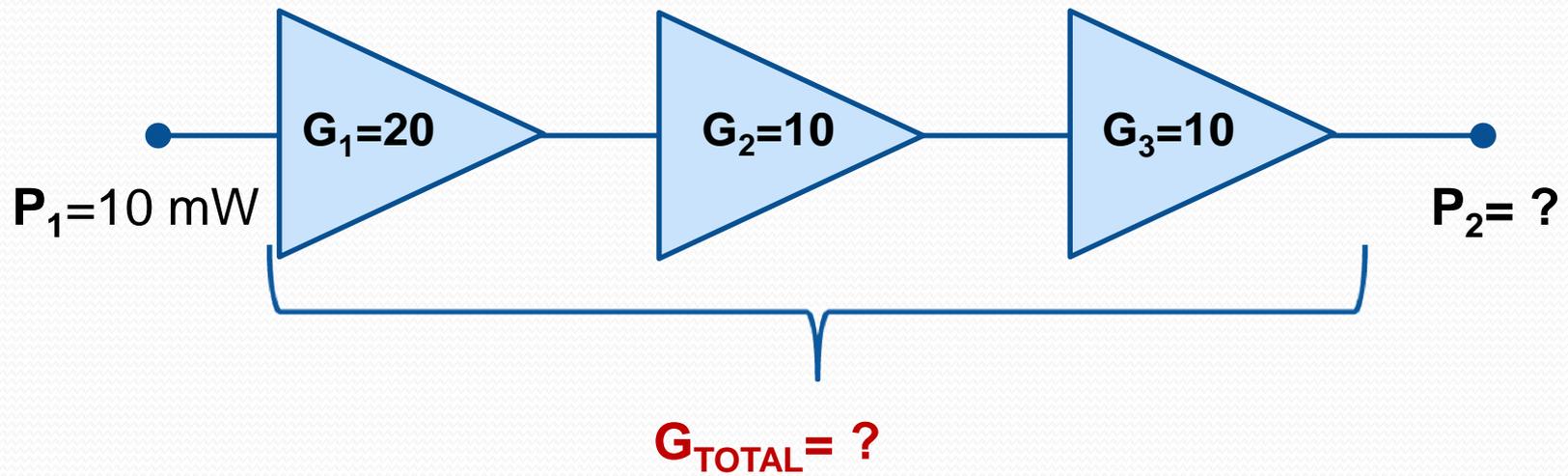
# Potência

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

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

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

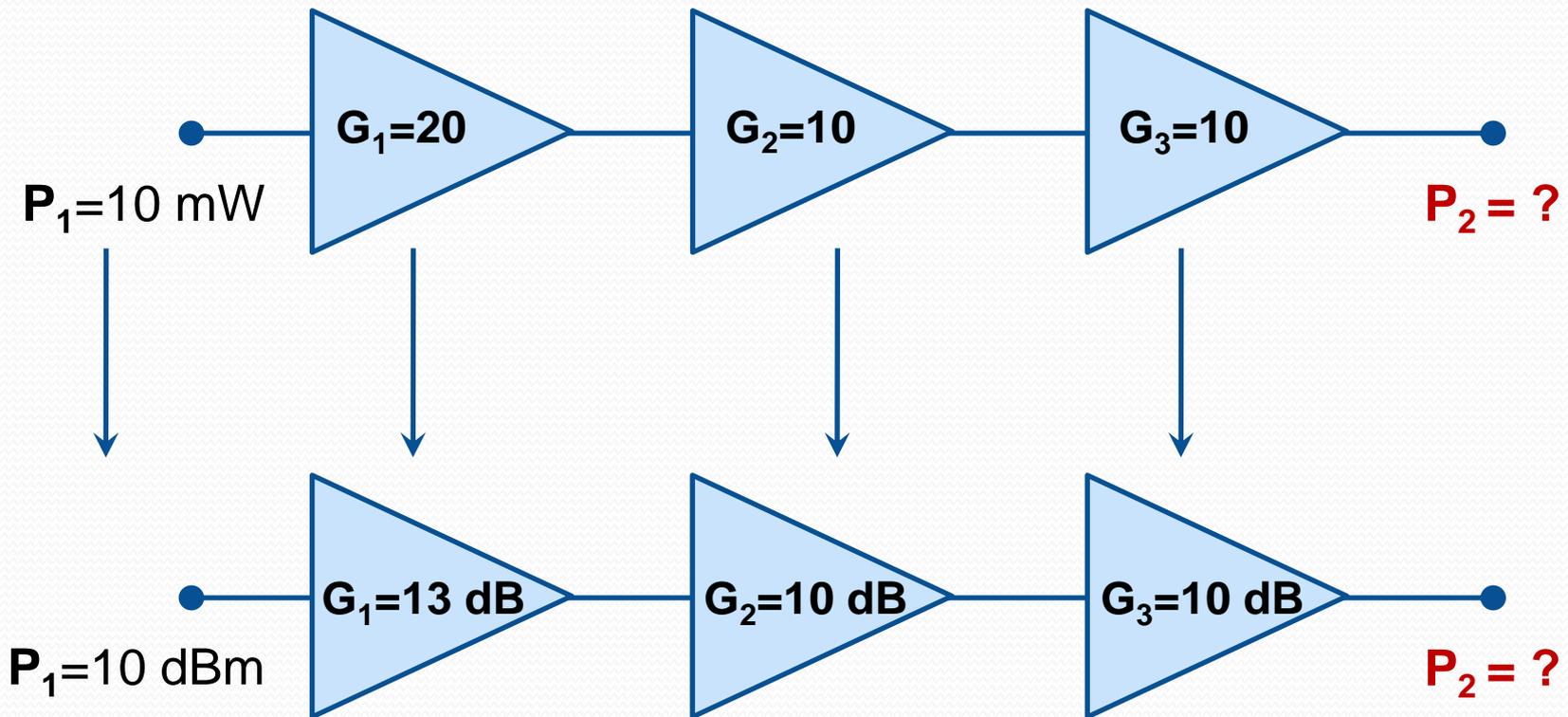
# Cálculos lineares de ganho e potência



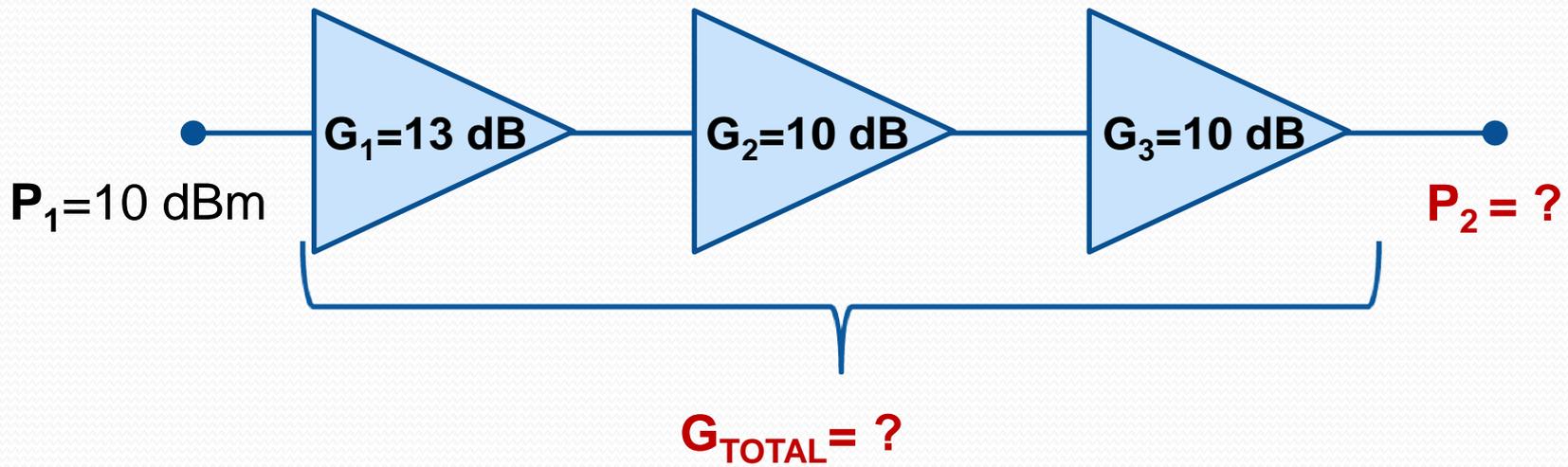
$$G_{TOTAL}(linear) = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 = 2.000$$

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

# Cálculos em decibéis de ganho e potência



# Cálculos em decibéis de ganho e potência



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

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