

# Introdução à Tecnologia Celular de 5ª Geração

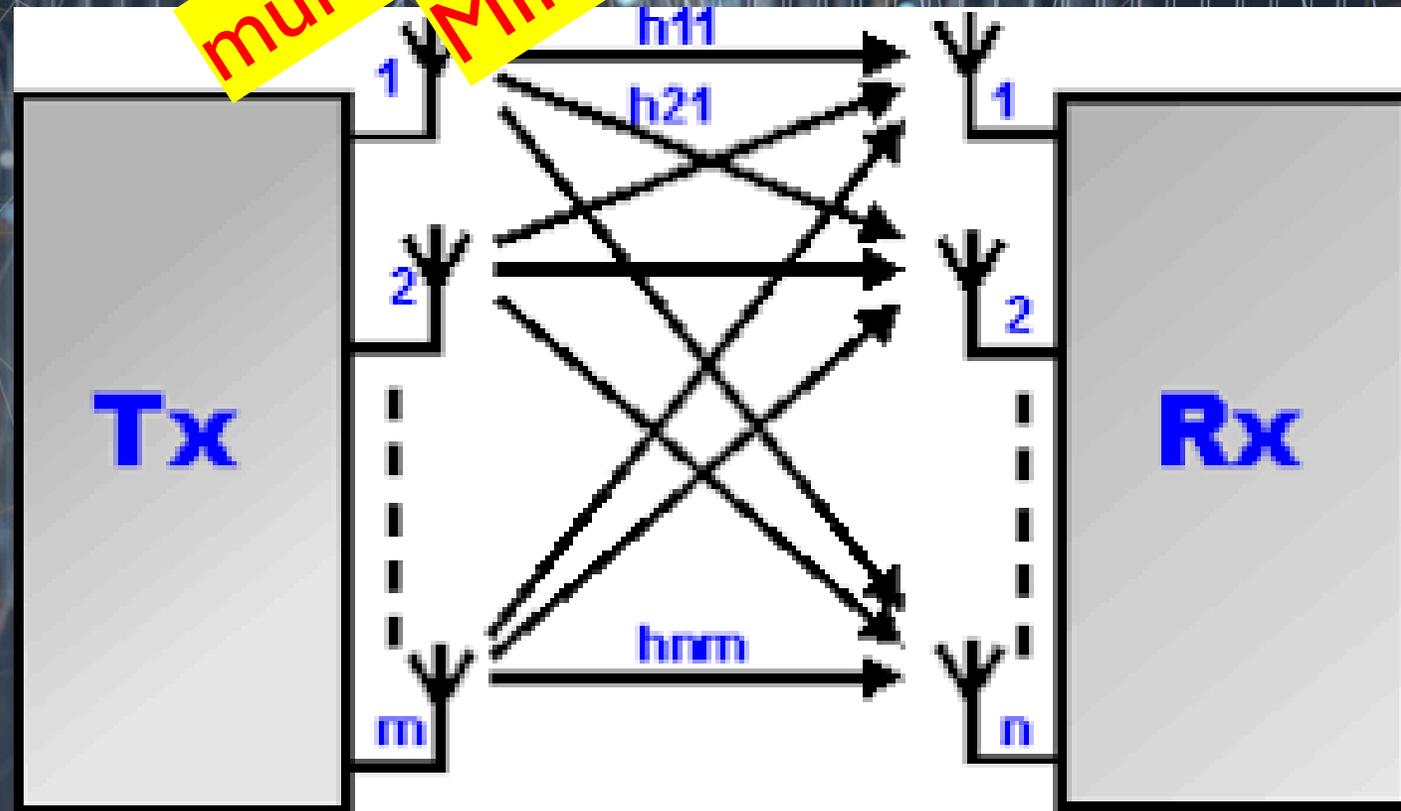
4ª parte

N5GG

Colin Buckup

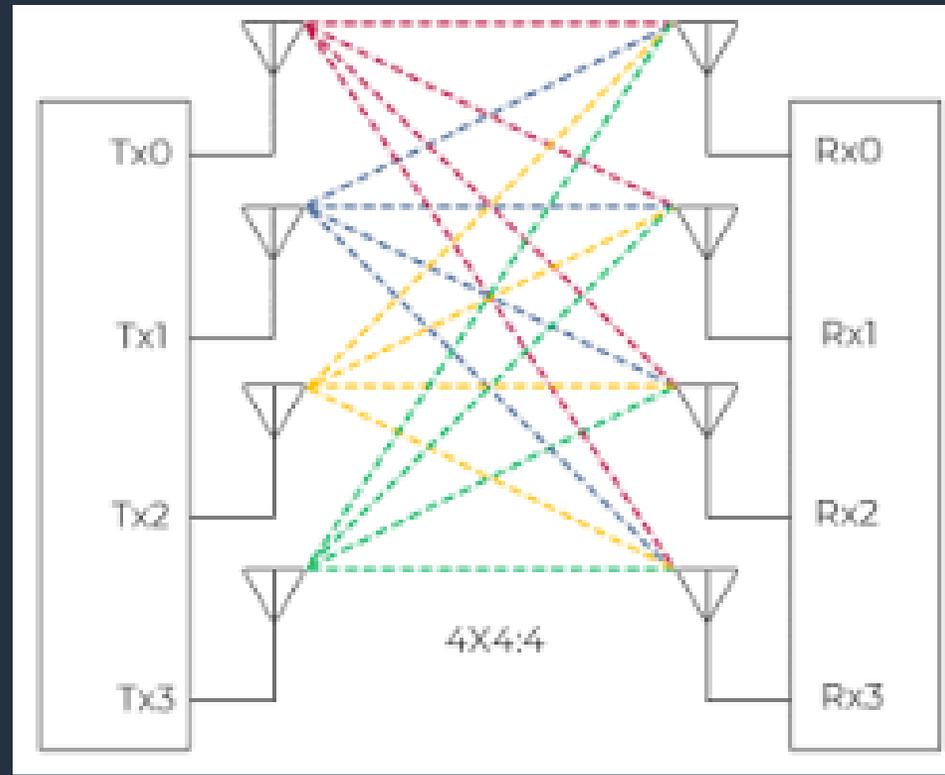
Julho 2020

Técnicas usando  
múltiplas antenas:  
MIMO

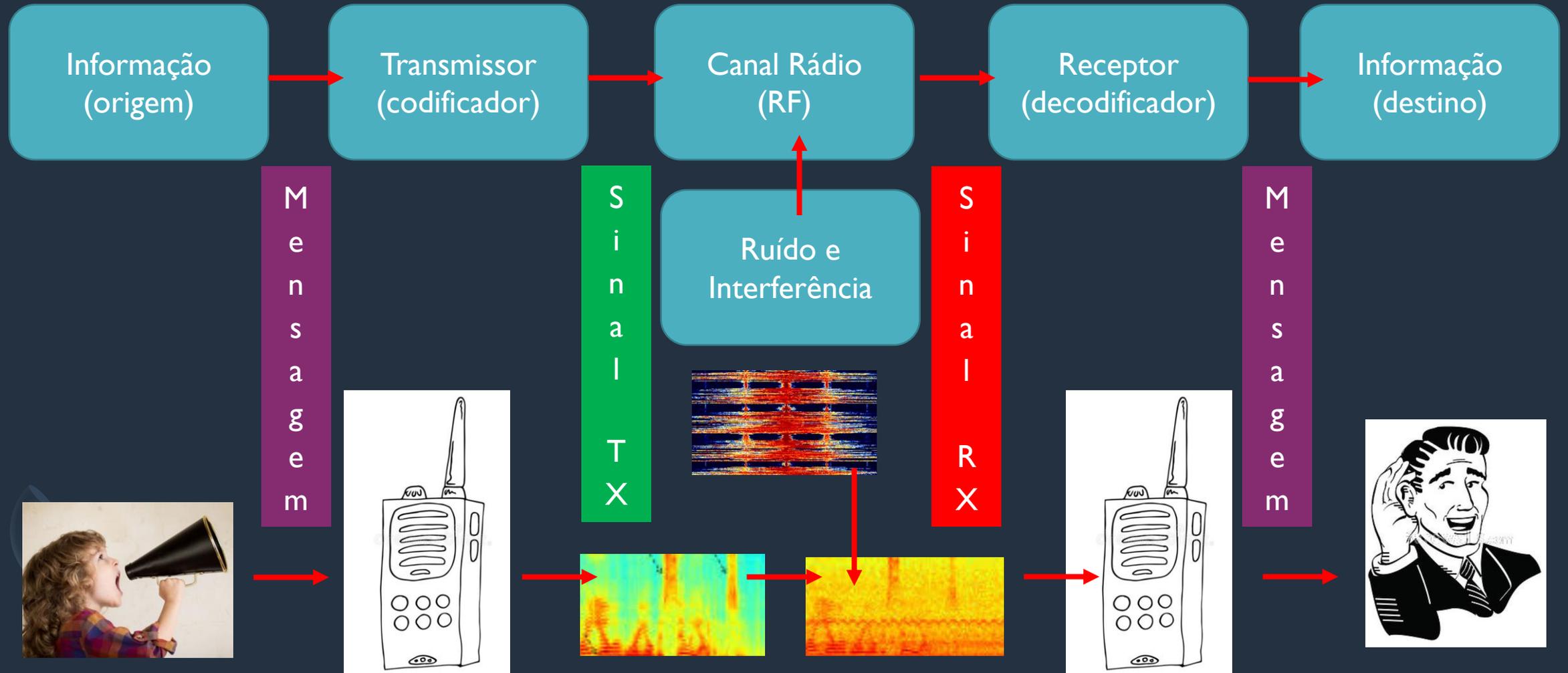


# Pontos de Discussão 4ª Parte

- Técnicas de múltiplas antenas: MIMO – Multiple INPUT Multiple OUTPUT



# Modelo de um canal RÁDIO (Shannon-Weaver 1949)



# TX/RX usando VHF analógico

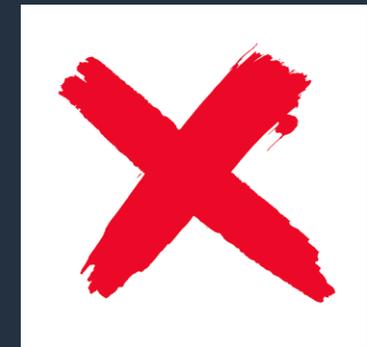
- Transmissor Único



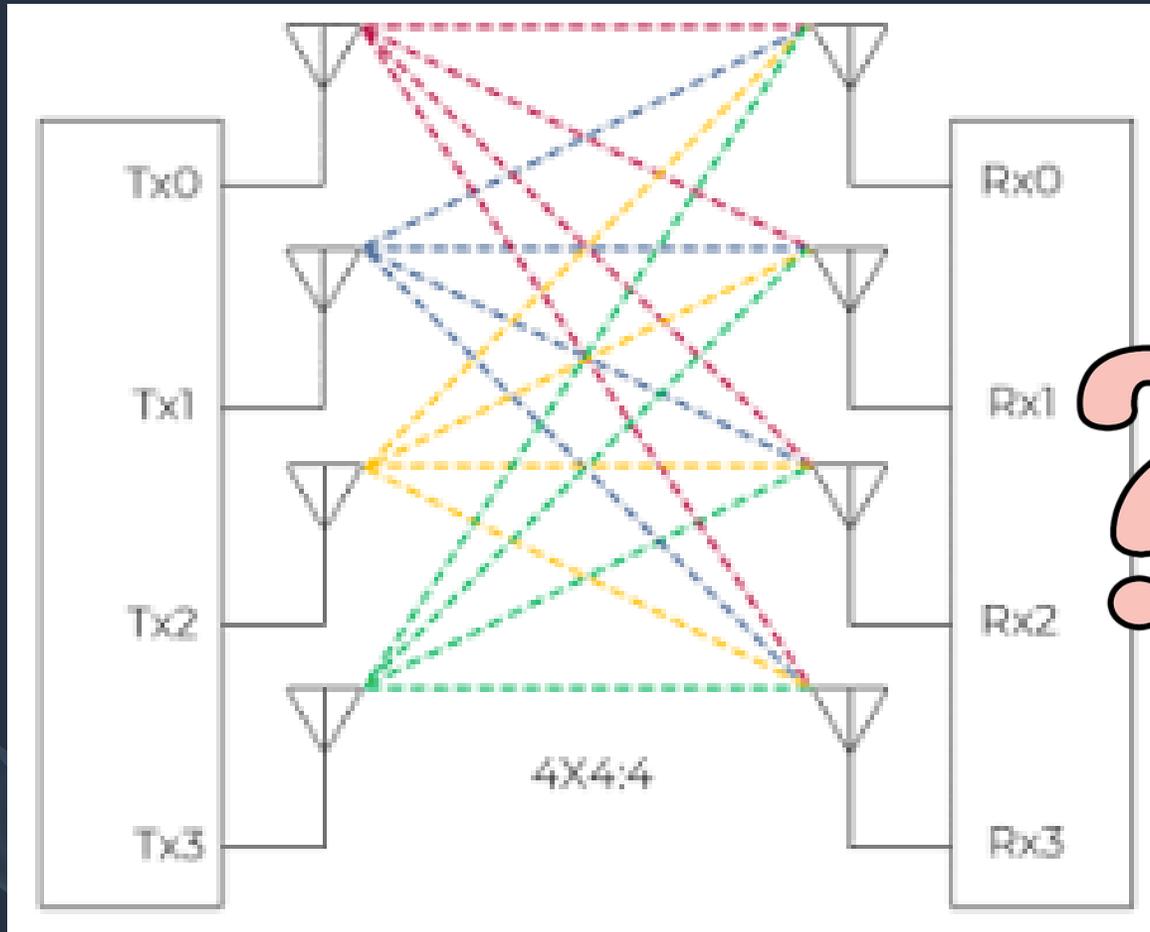
- Múltiplos Transmissores Simultâneos



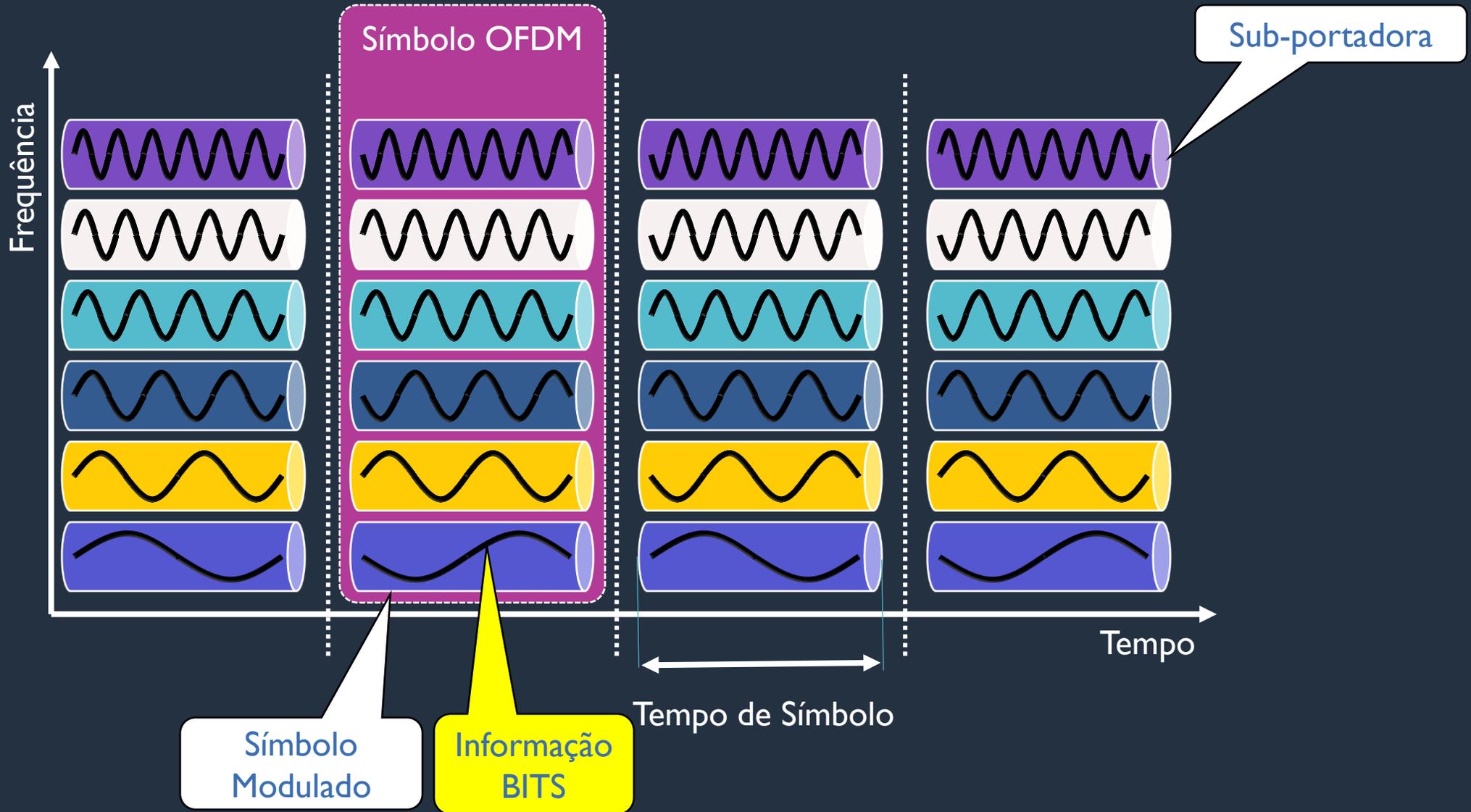
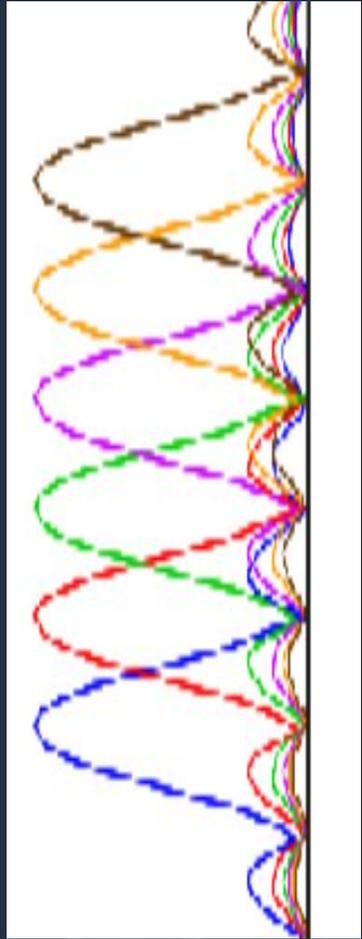
Interferência



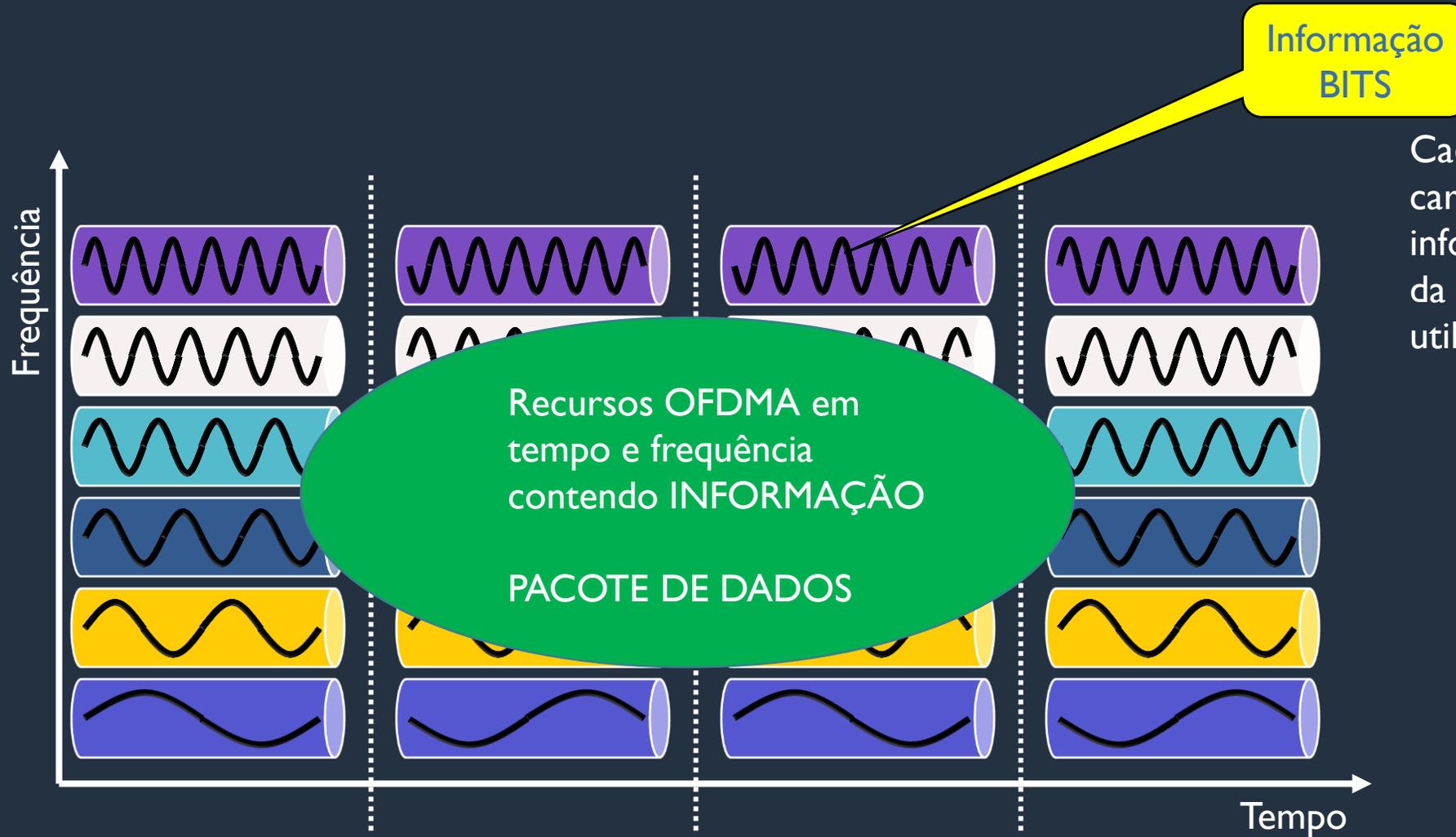
Será que é possível decodificar confiavelmente múltiplas transmissões digitais simultâneas?



# Lembrando OFDMA

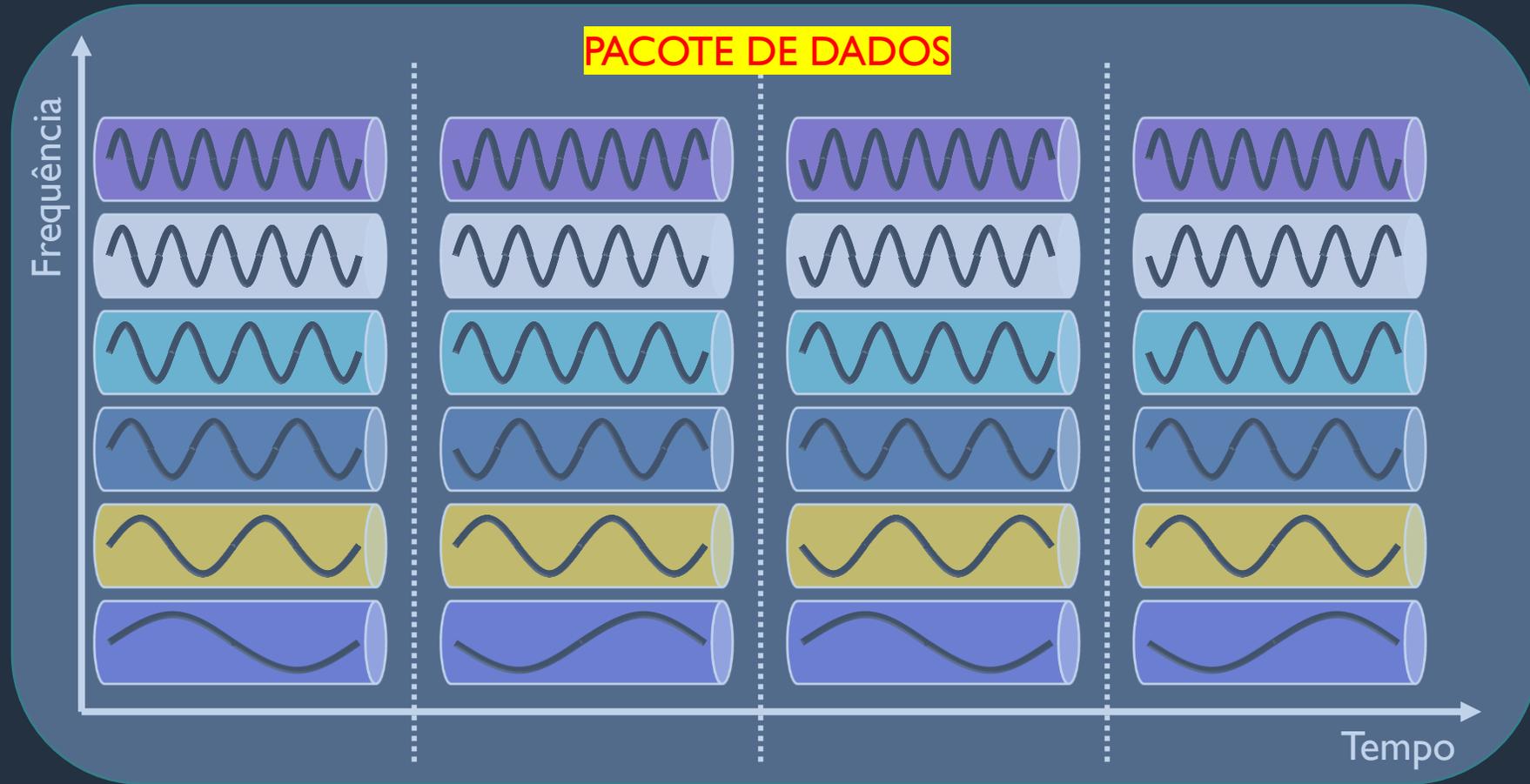


# Lembrando OFDMA

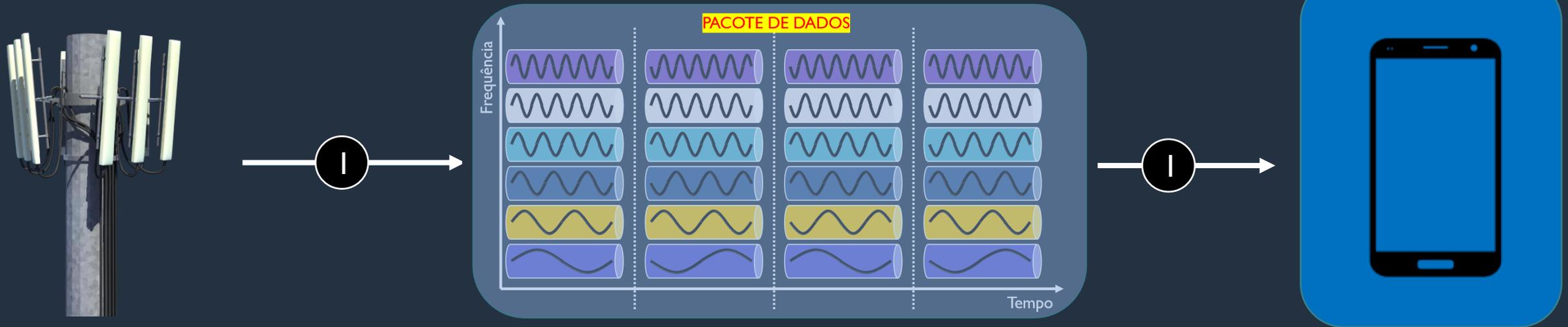


Cada símbolo modulado carrega 2, 4, 6 ou 8 bits de informação, dependendo da modulação que foi utilizada

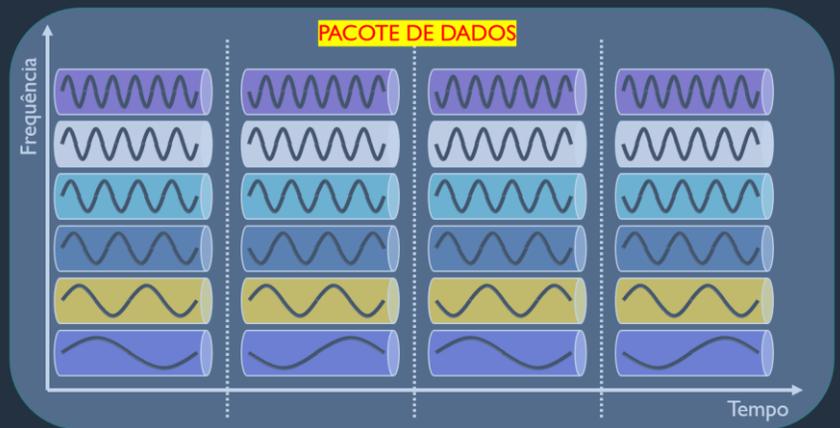
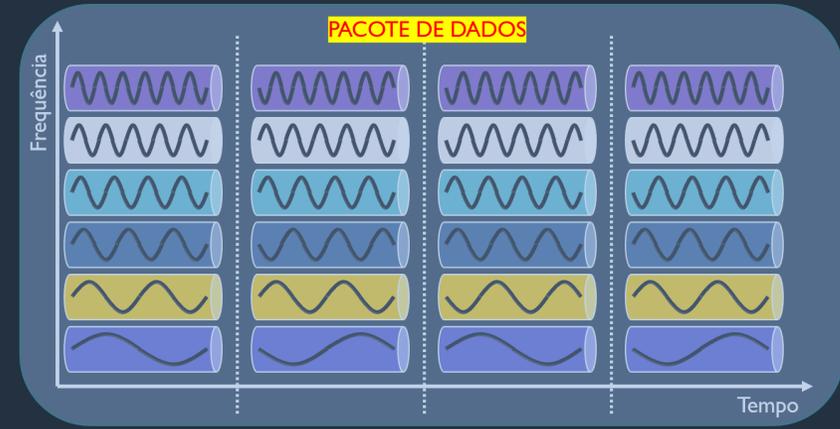
# Lembrando OFDM



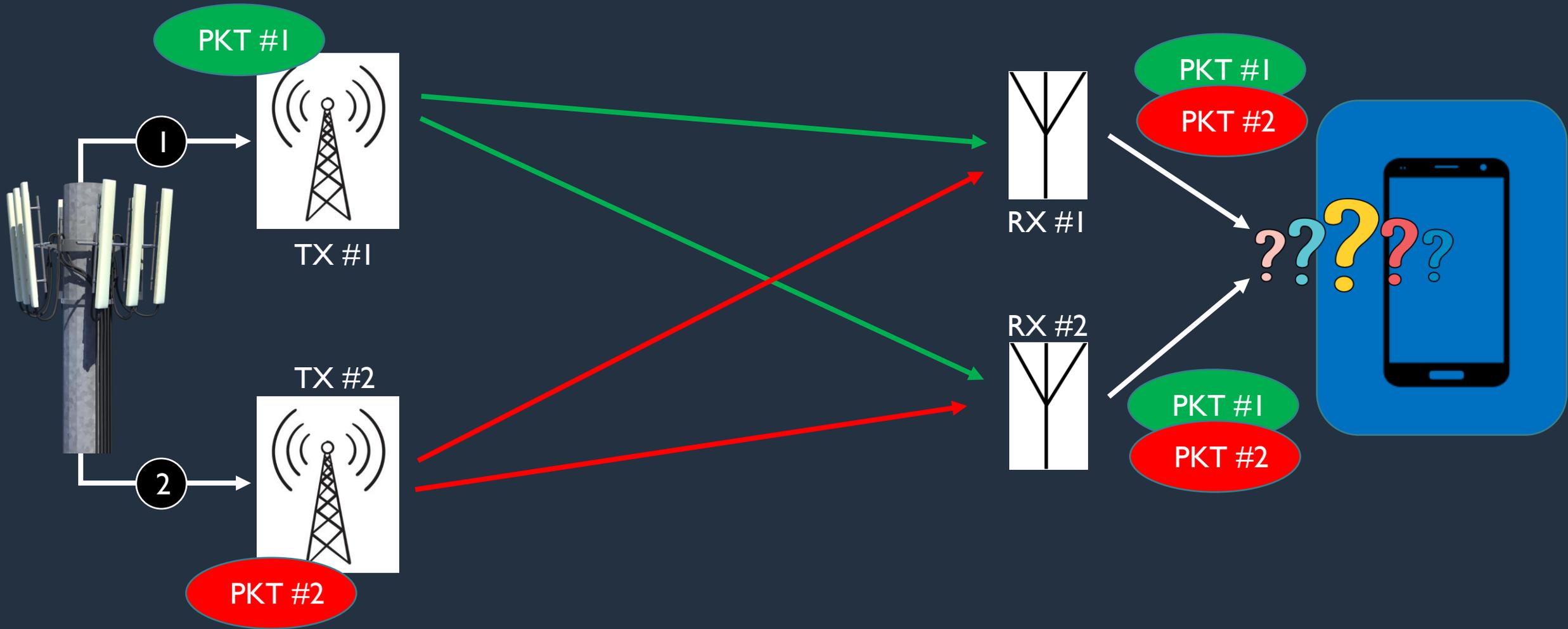
# Usando UMA antena para TX e RX



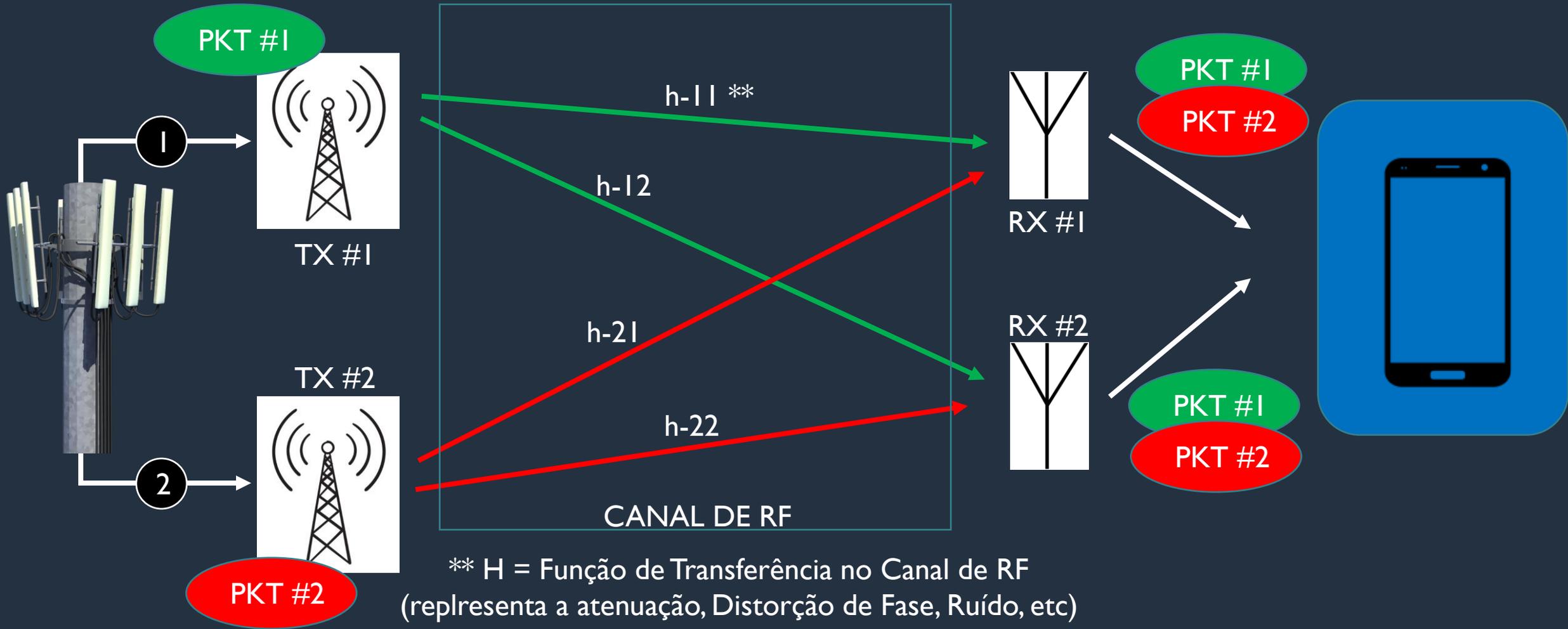
# Usando DUAS antenas para TX e RX



# Usando DUAS antenas para TX e RX



# Usando DUAS antenas para TX e RX

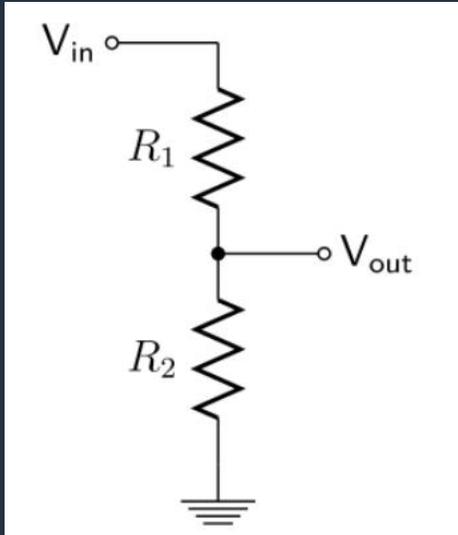


\*\* H = Função de Transferência no Canal de RF  
(representa a atenuação, Distorção de Fase, Ruído, etc)

Matematicamente:

$$|H| \cdot |Tx| = |Rx|$$

# Função de Transferência (Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo)



$$[V_2] = \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right] [V_1]$$

INPUT  
→

OUTPUT  
→

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + R_2 & R_2 \\ R_2 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

Exemplo: representando divisor de tensão usando matrizes e a função de transferência

# Matemática... ou Matemágica?

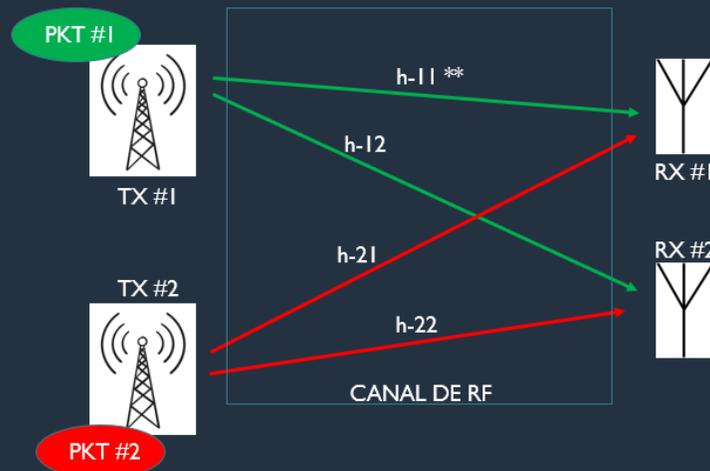


H = Função de Transferência no Canal de RF  
(representa a Atenuação, Distorção de Fase, Ruído, etc por trajeto entre TX e RX)

Matematicamente:

$$|H| \cdot |Tx| = |Rx|$$

Quer Dizer: o que é transmitido de forma 'limpa'  $|Tx|$  passa por um canal de RF que irá distorcer o sinal  $|H|$ , e o receptor vai receber esse sinal distorcido, alterado, interferido  $|Rx|$



$$\begin{vmatrix} TX_1 \\ TX_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} RX_1 \\ RX_2 \end{vmatrix}$$

✓ - VALORES CONHECIDOS  
○ - VALORES A CALCULAR

# Mais Matemática...

DOIS TRANSMISSORES  
DOIS RECEPTORES

$$\begin{bmatrix} TX_1 \\ TX_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RX_1 \\ RX_2 \end{bmatrix}$$

✓ - VALORES CONHECIDOS  
○ - VALORES A CALCULAR

- O sistema de equações ao lado têm mais variáveis desconhecidas que equações disponíveis...
- Lembrando da época de 2º grau, sabemos que para resolvermos um sistema de equações, o número de variáveis não pode ser maior que o número de equações...

O que sabemos (do ponto de vista do receptor)?

- Temos  $RX_1$  e  $RX_2$ , os dois sinais que acabam de ser recebidos e digitalizados pelo receptor.
- Não temos os termos da matriz  $H$  que compõe a função de transferência do canal de RF (não sabemos a qualidade da RF)
- Não temos  $TX_1$  e  $TX_2$ , que são obviamente os termos para os quais buscamos a resposta.

Para resolvermos o sistema de equações **PRECISAMOS** saber os termos que compõe a matriz  $H$ , a função de transferência.



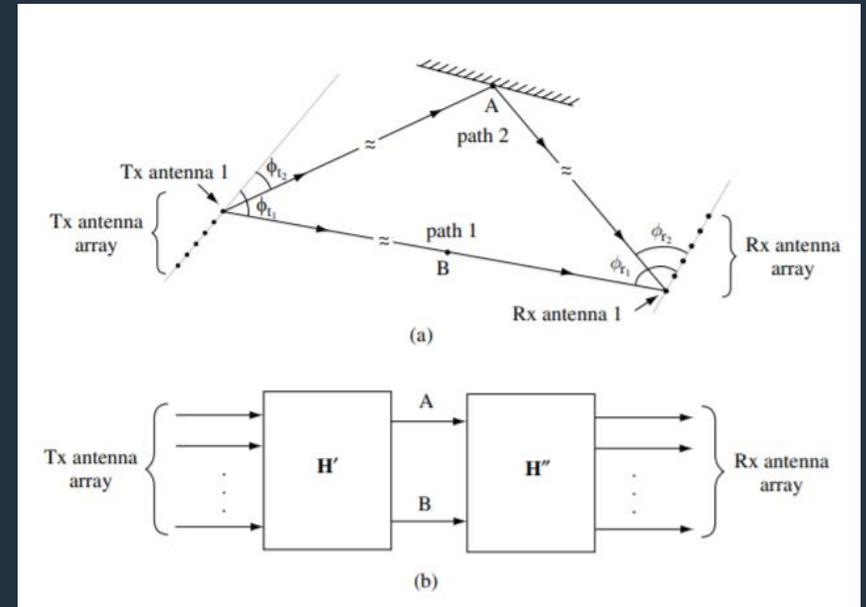
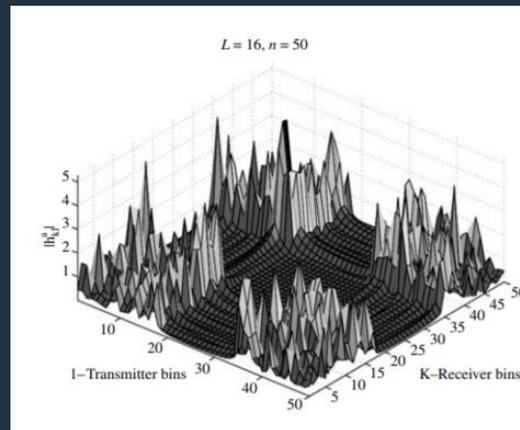
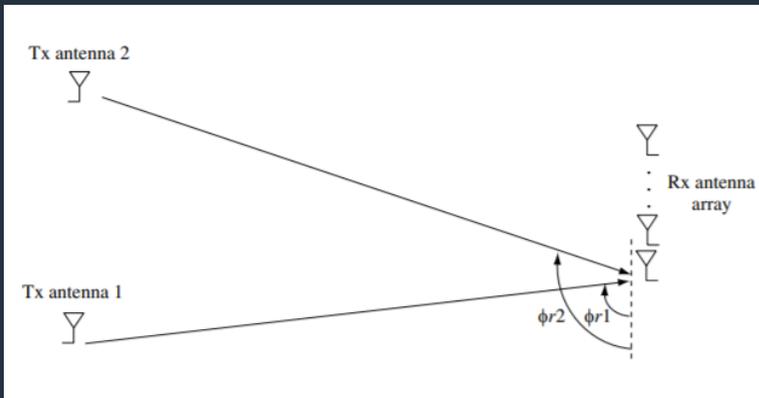
# As CPU's do RX calculam MUITO para recuperar os dados em canal MIMO

$$\mathbf{h} = a \exp\left(-\frac{j2\pi d}{\lambda_c}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi\Delta_r\Omega) \\ \exp(-j2\pi2\Delta_r\Omega) \\ \vdots \\ \exp(-j2\pi(n_r-1)\Delta_r\Omega) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{e}_r(\Omega) := \frac{1}{\sqrt{n_r}} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(-j2\pi\Delta_r\Omega) \\ \exp(-j2\pi2\Delta_r\Omega) \\ \vdots \\ \exp(-j2\pi(n_r-1)\Delta_r\Omega) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H} = a\sqrt{n_t n_r} \exp\left(-\frac{j2\pi d}{\lambda_c}\right) \mathbf{e}_r(\Omega_r) \mathbf{e}_t(\Omega_t)^*,$$

$$C = \log\left(1 + \frac{Pa^2 n_t n_r}{N_0}\right) \text{ bits/s/Hz.}$$



# Solução do problema em duas etapas



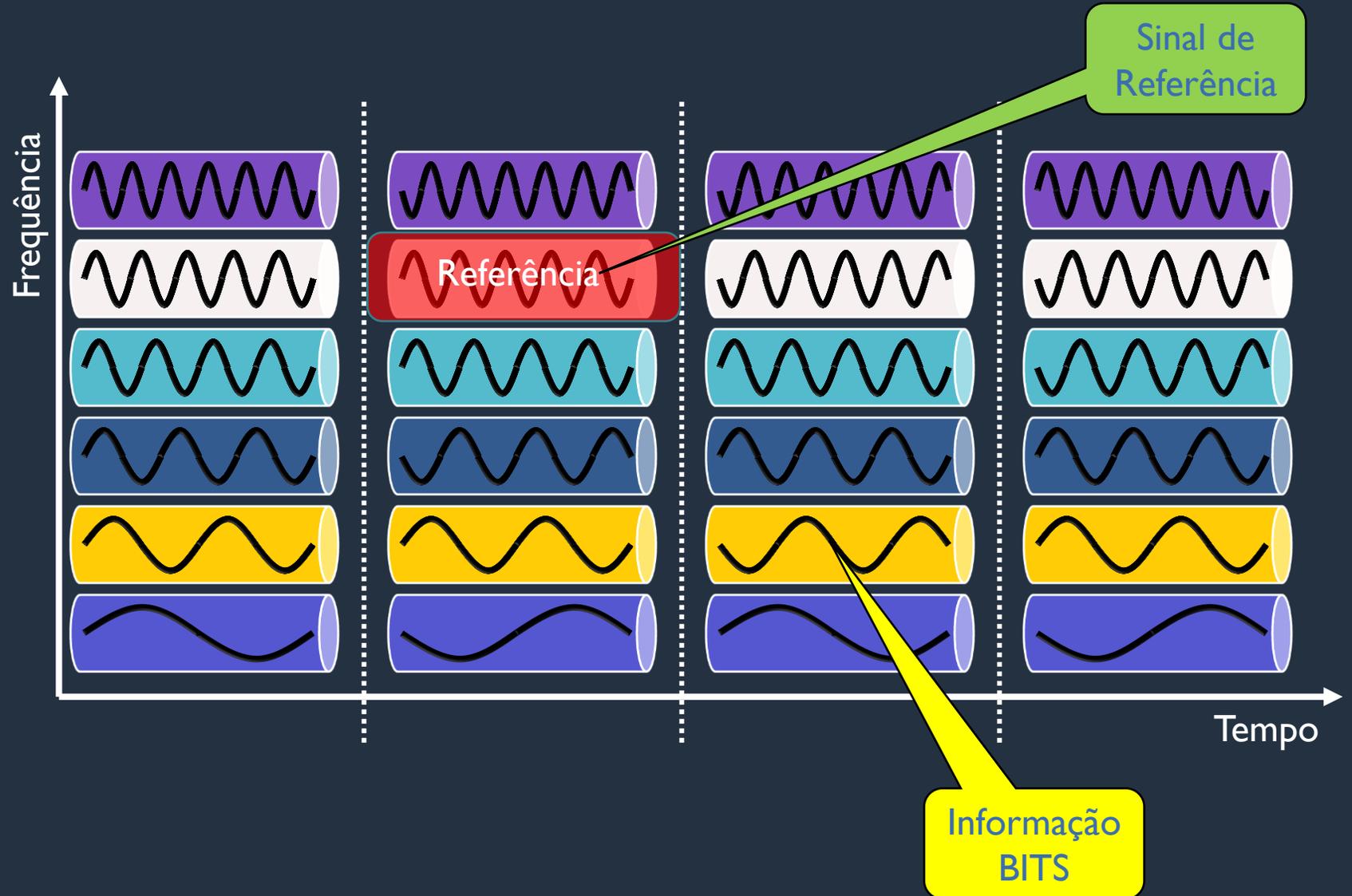
**Etapa 1** – Descobrir a qualidade do link de RF e calcular a função de transferência de canal – **H**

**Etapa 2** – Tendo H, resolver o sistema de equações e achar a solução para **TX1 e TX2**

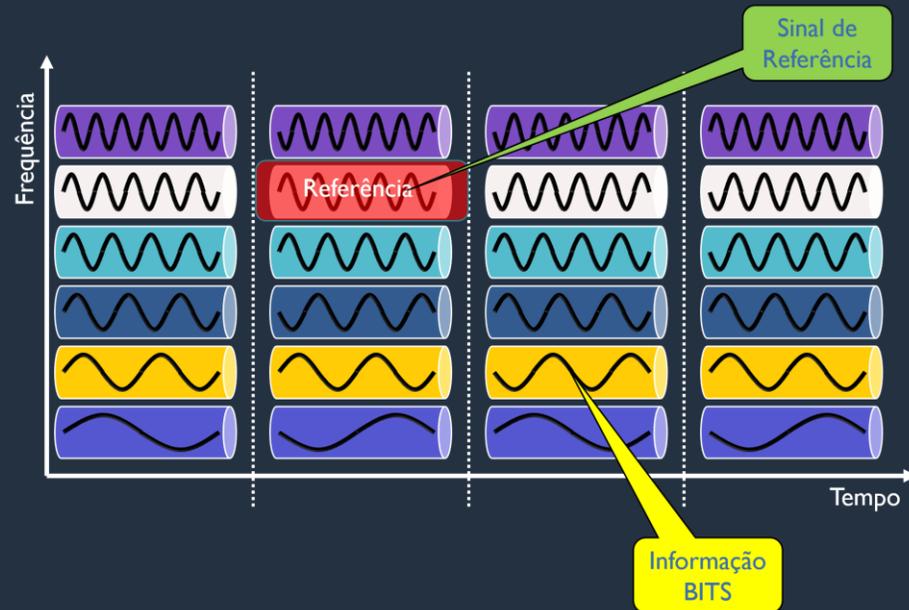
Tudo isso é realizado pelo receptor e a operação é repetida continuamente, pois o link de RF varia constantemente.



# Etapa 1 – Como calcular a Qualidade do Link RF



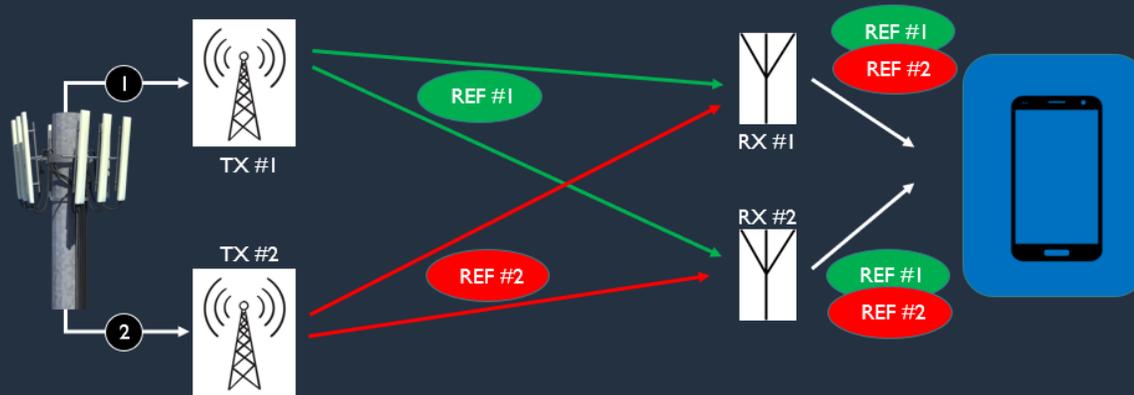
# Usando Sinais de Referência



Características do sinal de referência:

- É **sinal conhecido** pelo Transmissor e pelo **Receptor**
- **Não transporta informação** (bits), é apenas o sinal de referência (beacon)
- Possui **posição conhecida em frequência e tempo**, o receptor sabe onde 'ir escutar' o sinal de referência

# Calculando a Função de Transferência



Cada **transmissor** transmite **um** sinal de **referência**

A **posição** em tempo e frequência dos sinais de referência de **TX1 e TX2 são distintos**

Com a detecção dos sinais de referência o receptor calcula o valor de  $H$  – a matriz que representa a função de transferência

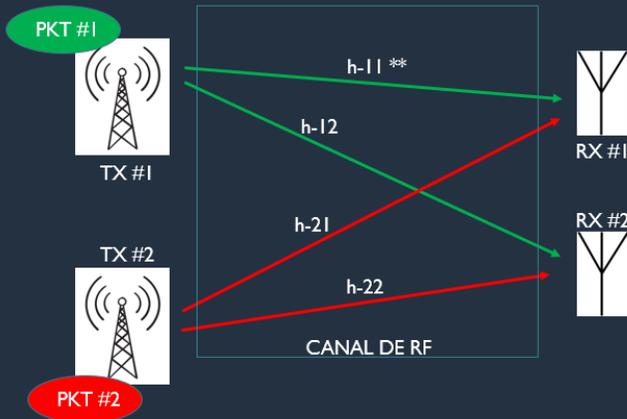
$$\begin{bmatrix} \text{TX}_{\text{REF}_1} \\ \text{TX}_{\text{REF}_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{RX}_1 \\ \text{RX}_2 \end{bmatrix}$$

✓ - VALORES CONHECIDOS  
○ - VALORES A CALCULAR

Agora temos os valores da **matriz H**

$\begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{21} \\ h_{22} \end{bmatrix}$

# Etapa 2 – Calculando TX1 e TX2



Valores conhecidos:

RX1 – Sinal recebido e digitalizado pelo receptor 1

RX2 – Sinal recebido e digitalizado pelo receptor 2

$h11$  – Componente da Matriz da Função de Transferência do Canal de RF

$h12$  – Componente da Matriz da Função de Transferência do Canal de RF

$h21$  – Componente da Matriz da Função de Transferência do Canal de RF

$h22$  – Componente da Matriz da Função de Transferência do Canal de RF

DOIS TRANSMISSORES TX1 ; TX2  
DOIS RECEPTORES RX1 ; RX2

$$\begin{pmatrix} TX_1 \\ TX_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RX_1 \\ RX_2 \end{pmatrix}$$

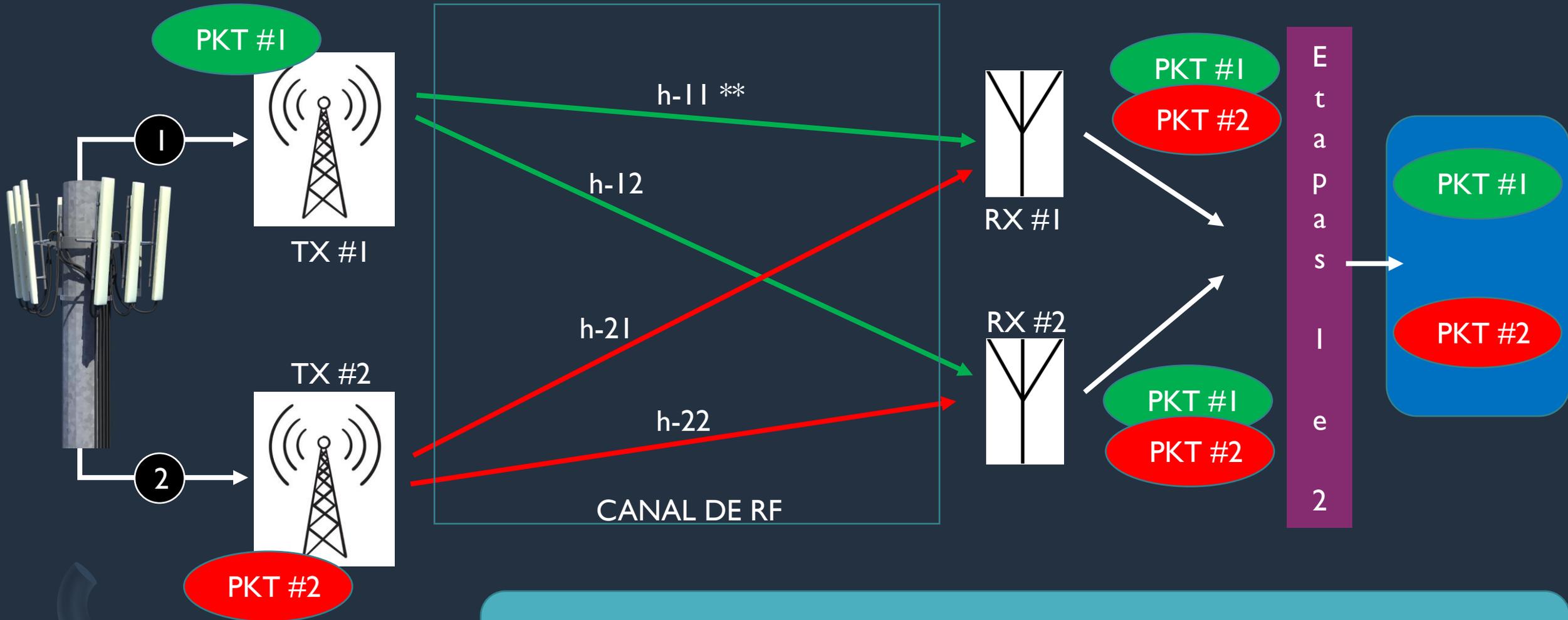
✓ - VALORES CONHECIDOS  
○ - VALORES A CALCULAR

Agora podemos tranquilamente calcular:

TX1 – Sinal TRANSMITIDO pelo transmissor 1

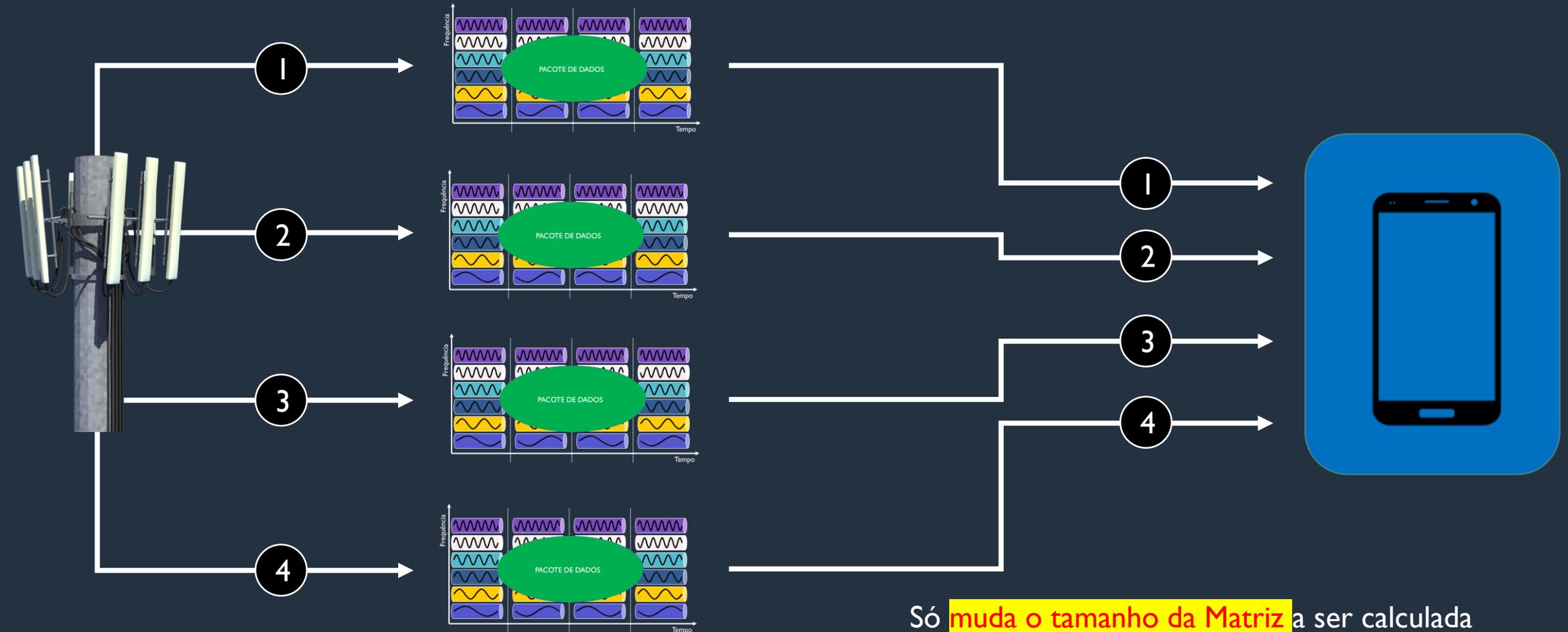
TX2 – Sinal TRANSMITIDO pelo transmissor 2

# Recuperando os Dados



**IMPORTANTE:** Para um Sistema MIMO funcionar, é necessário o espaçamento físico das antenas, tanto no transmissor, como no receptor. Recomendação é espaçamento por polarização e/ou por distância (10x comprimento de onda)

# Usando QUATRO antenas para TX e RX



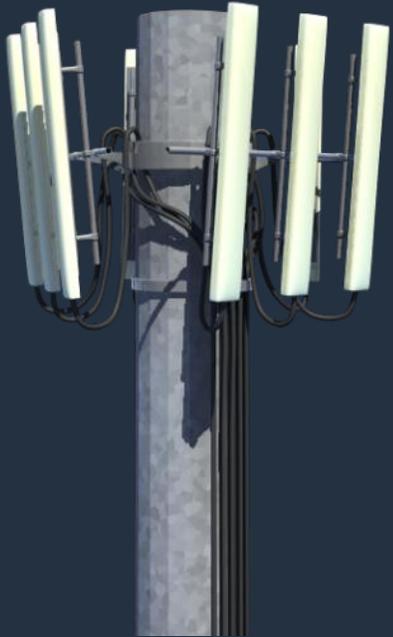
Só **muda o tamanho da Matriz** a ser calculada

O processo é o mesmo

**Etapa 1** – Calcular Matriz H

**Etapa 2** – Recuperar a informação TX1, 2, 3 e 4

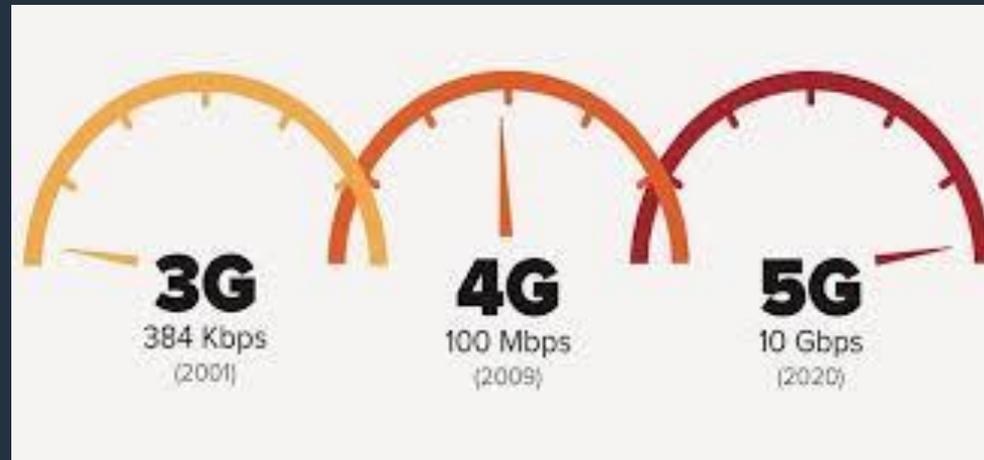
# Impacto de Técnicas MIMO



A **capacidade de canal é multiplicada por 2, 4 ou 8 vezes**, dependendo se temos um sistema MIMO 2x2; 4x4 ou 8x8

**Impacto DIRETO nas velocidades de transmissão de dados** – Throughput no canal de RF

Só funciona se a qualidade do canal de RF for “adequada” (bom SINR)



# O que aprendemos nesta apresentação

Exemplo de um canal de RF baseado no modelo de Shannon-Weaver | 1949

Interferência e ruído no canal de RF dificulta / impossibilita a decodificação de uma mensagem recebida pelo receptor

Normalmente a reutilização de recursos (uso concomitante de mesma frequência no mesmo instante de tempo) resulta em interferência mútua entre transmissores e impossibilidade de decodificação das mensagens pelos receptores

Em 4G / 5G utilizamos técnicas de múltiplas antenas para neutralizar a interferência e assim aumentar a capacidade de canal.

Sistemas MIMO em 4G e 5G podem ser:

2x2 MIMO – 2 antenas de TX e 2 antenas de RX – capacidade do canal x2  
4x4 MIMO – 4 antenas de TX e 4 antenas de RX – capacidade do canal x4  
8x8 MIMO – 8 antenas de TX e 8 antenas de RX – capacidade do canal x8

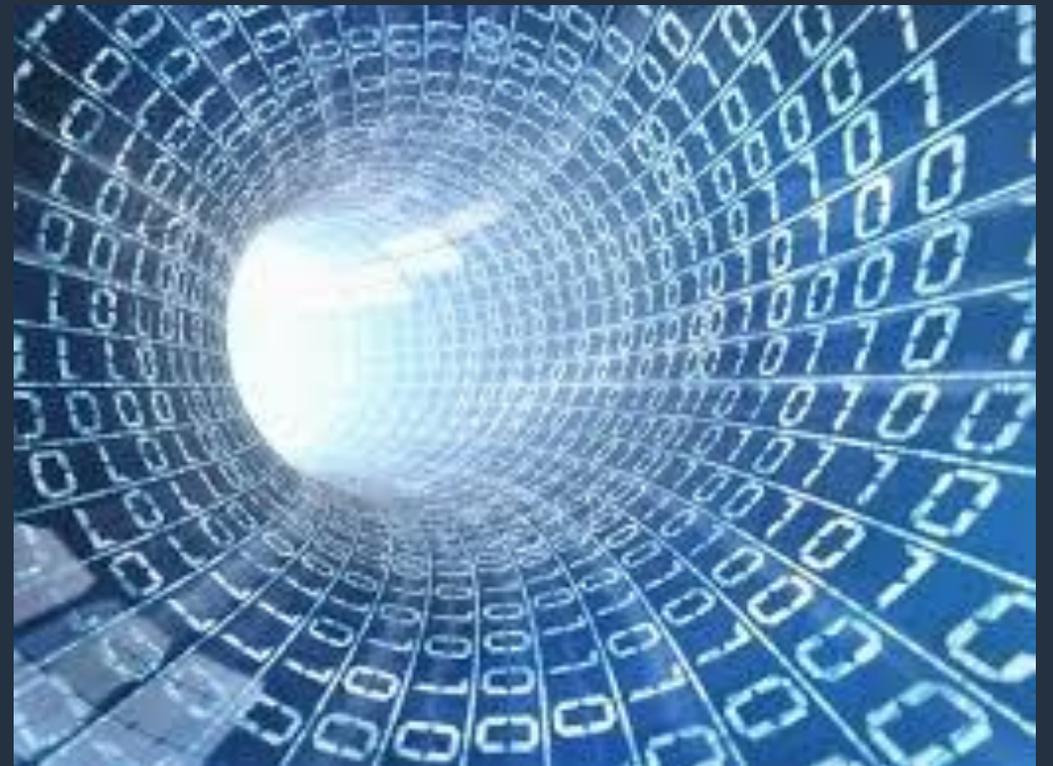
Para a técnica MIMO funcionar necessitamos:

- Múltiplas antenas no lado do transmissor
- Múltiplas antenas no lado do receptor
- SINR – Relação Sinal/Ruído adequada (Boas condições de RF)
- Existência de sinais de referência (sinal piloto) transmitidos pelos transmissores para permitir aos receptores detectar as antenas que transmitiram

Não confundir sistemas MIMO com sistemas de antenas para concentração de feixe (beam forming).

# Próxima Apresentação – 5ª parte

- Cálculo simplificado de Velocidade de Transmissão em 4G / 5G



# Perguntas e Respostas



Muito Obrigado!

73 de N5GG

Colin

