

Cerise

**CENTRO DE EXCELÊNCIA EM REDES INTELIGENTES
SEM FIO E SERVIÇOS AVANÇADOS - UFG**

**Centro de Excelência em Redes Inteligentes Sem Fio e
Serviços Avançados**

Localização em Ambiente Indoor Usando a Rede Celular

Grupo/Eixo Temático: 5G-OPEN RAN

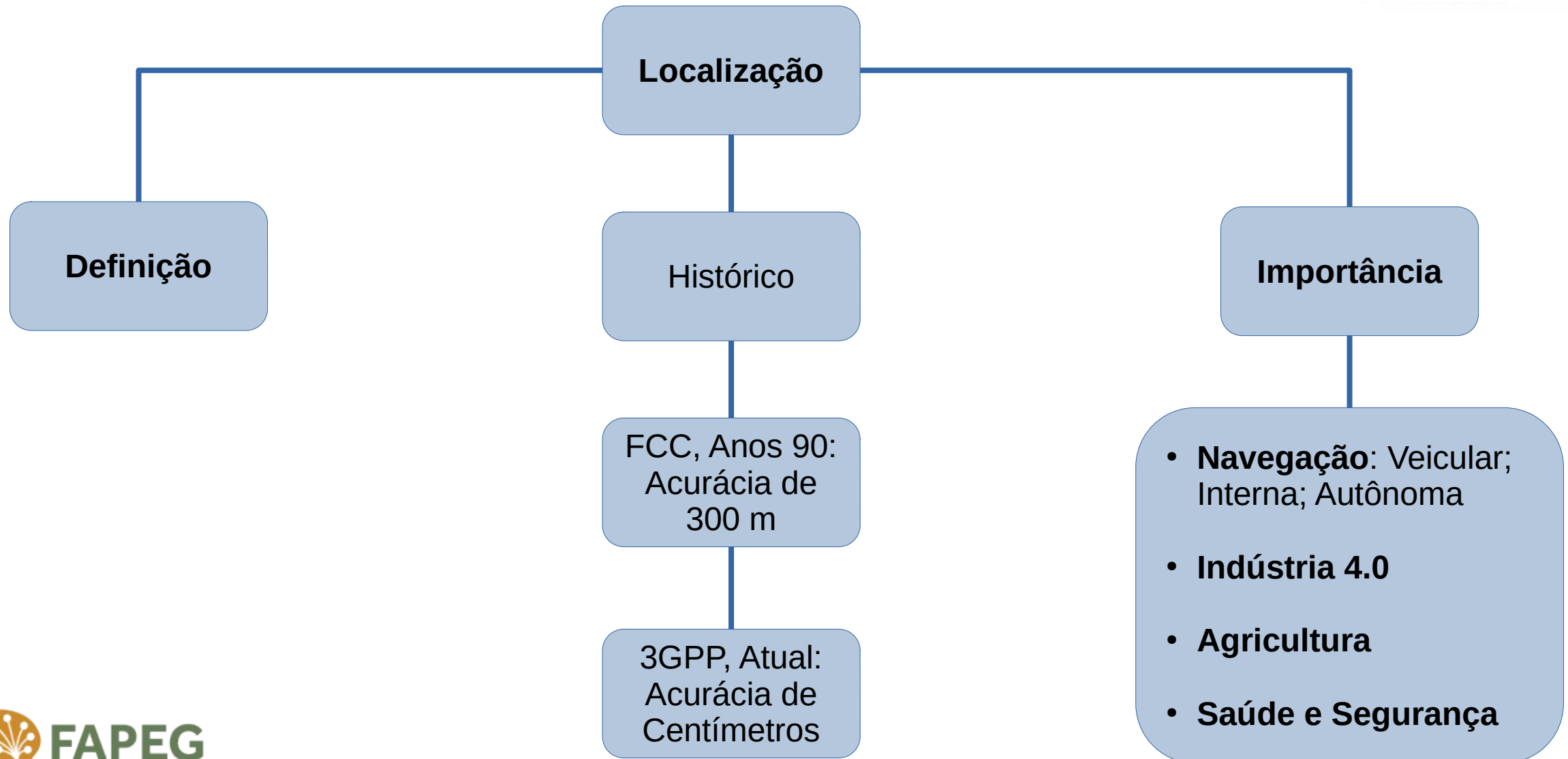
Participante: Paulo Francisco da Conceição

Coordenador do Grupo: Flávio Geraldo

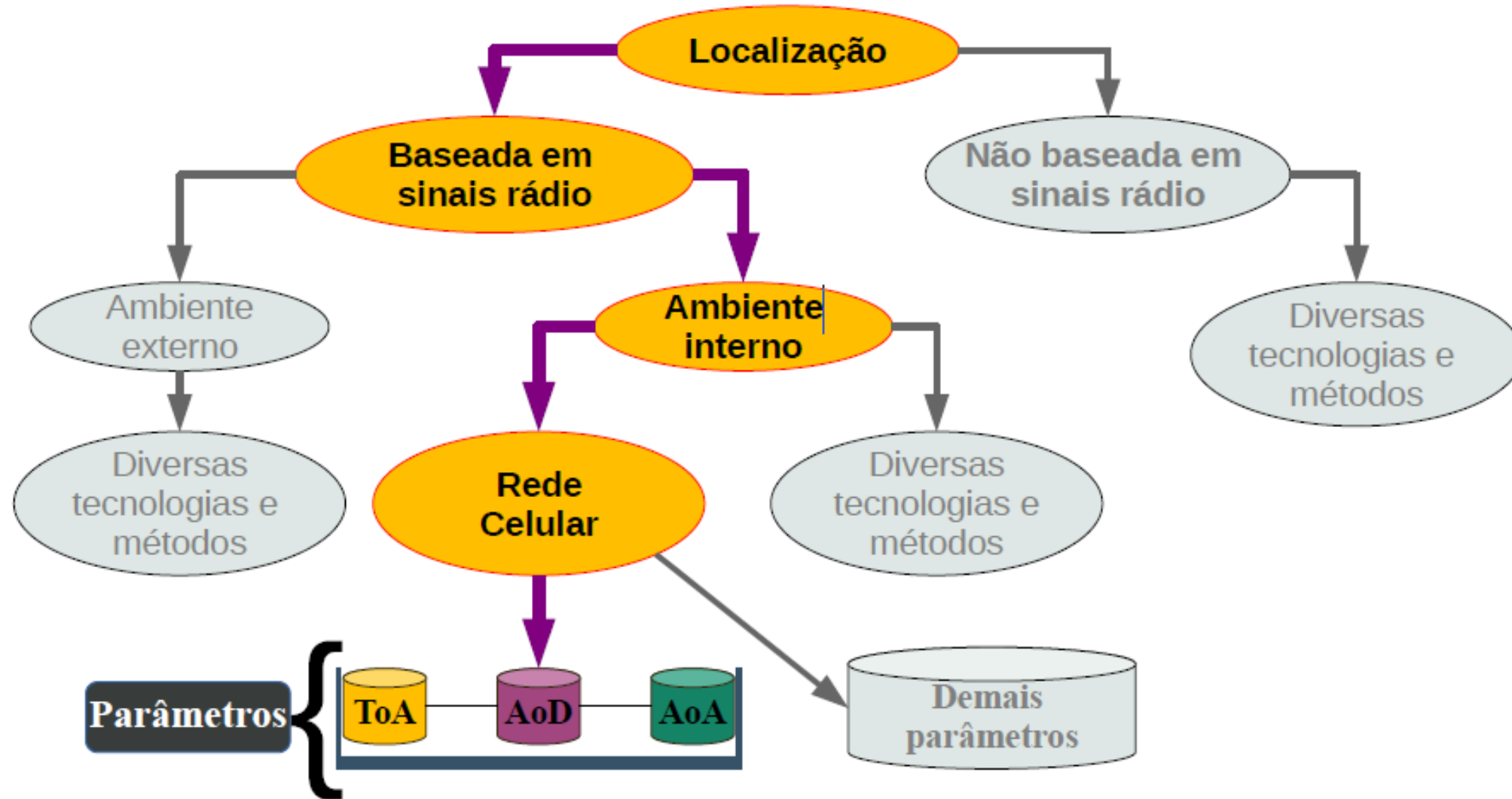
Sumário

1. Introdução
2. Parâmetros, Técnicas e Tecnologias Usadas na Localização
3. Localização Usando a Rede Celular
4. Modelagem do Canal
5. Estimação de Parâmetros
6. Métodos de Localização
7. Conclusões

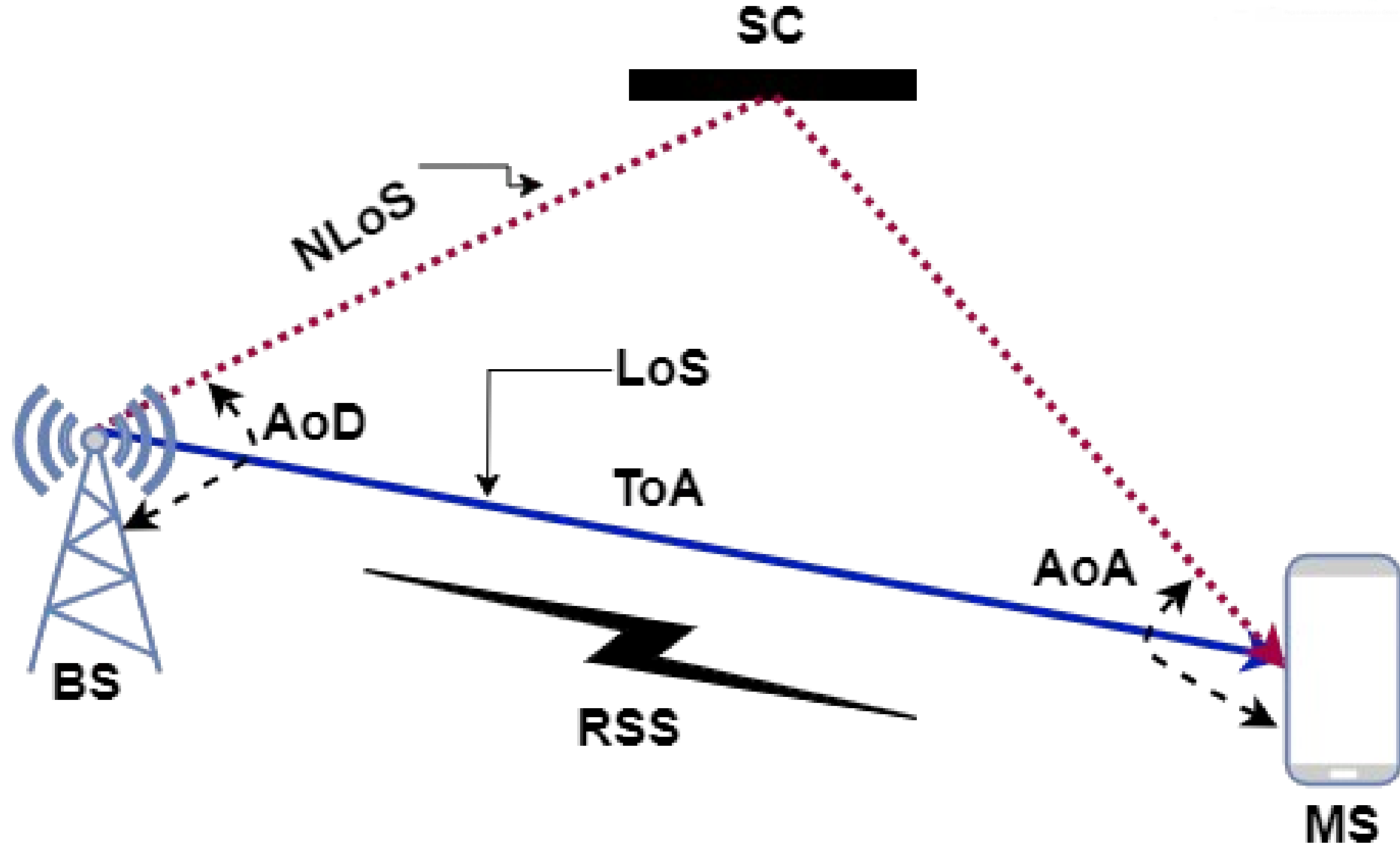
Introdução



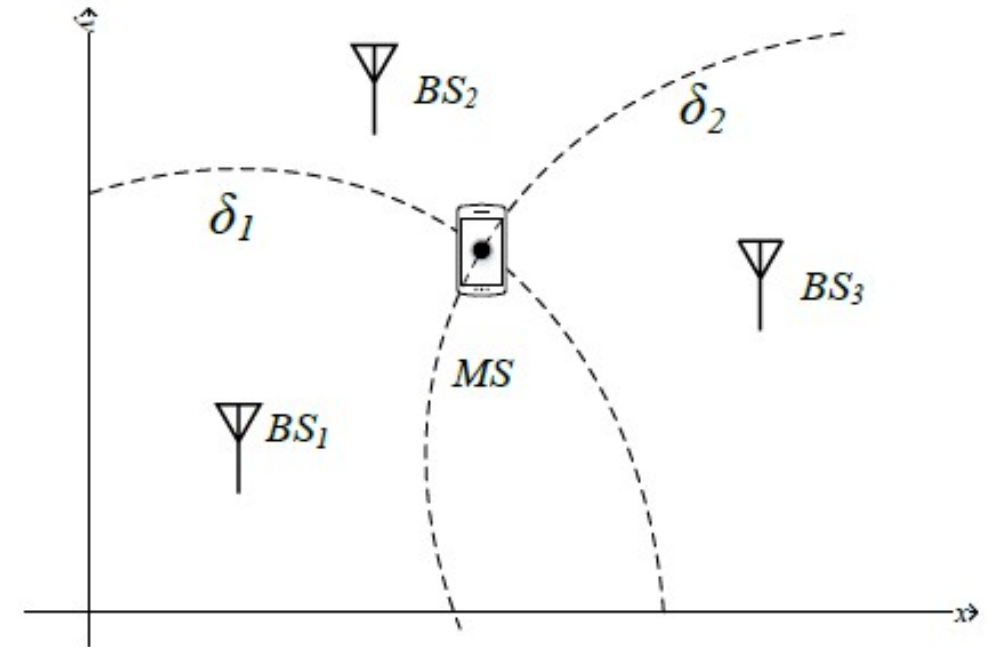
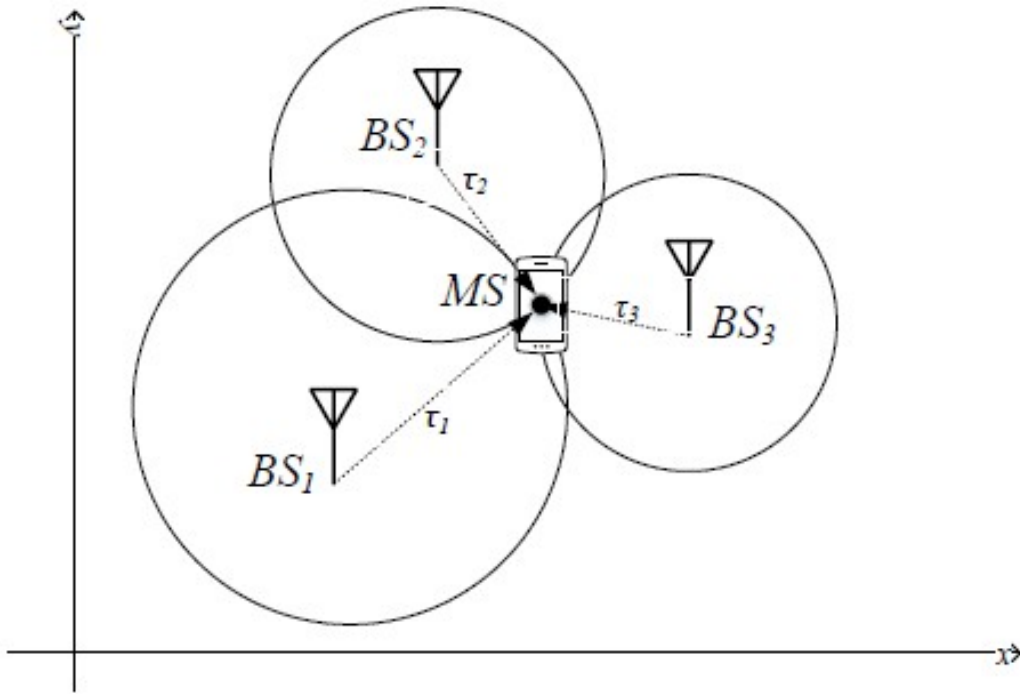
Escopo das Contribuições



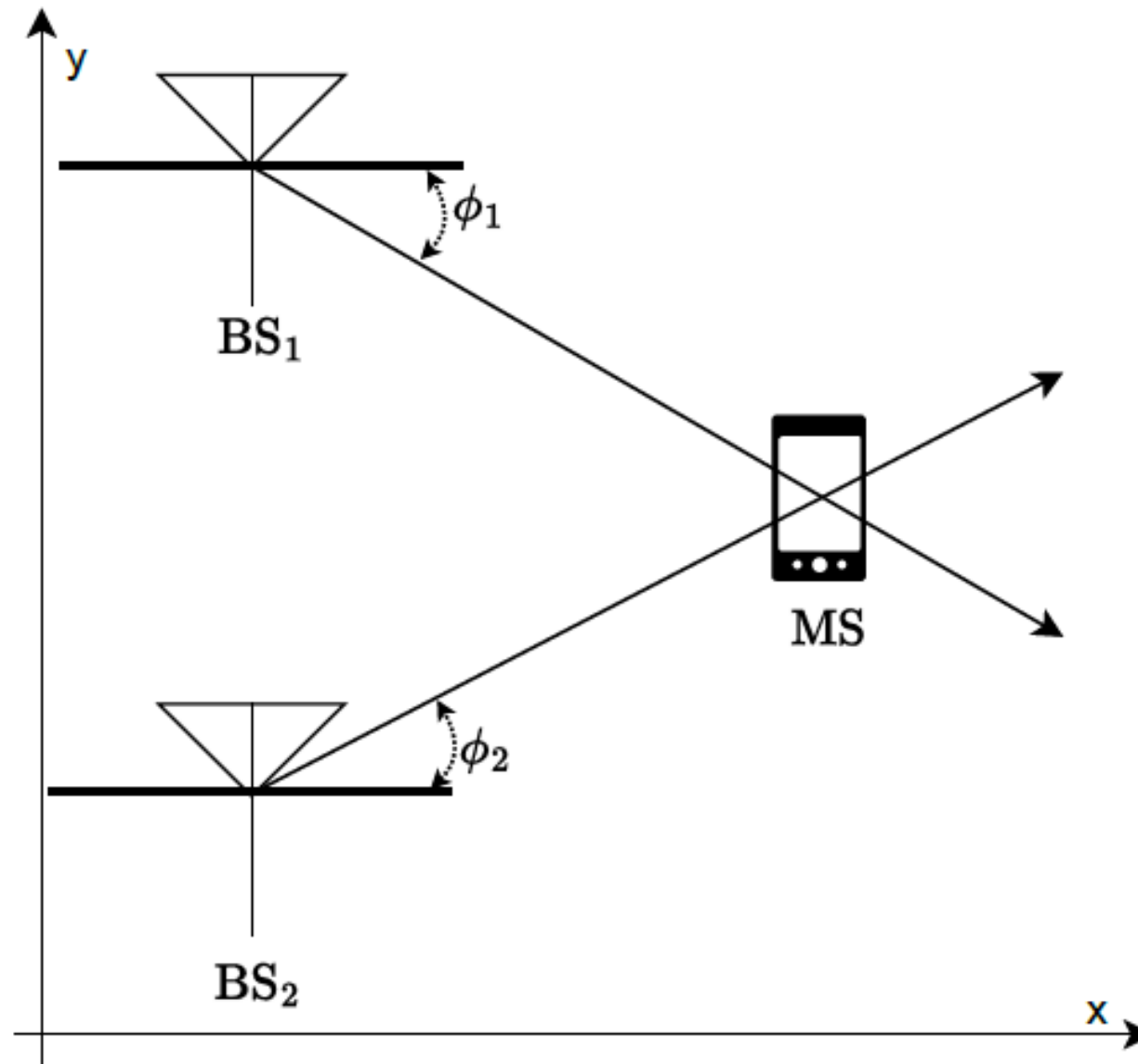
Parâmetros de Localização



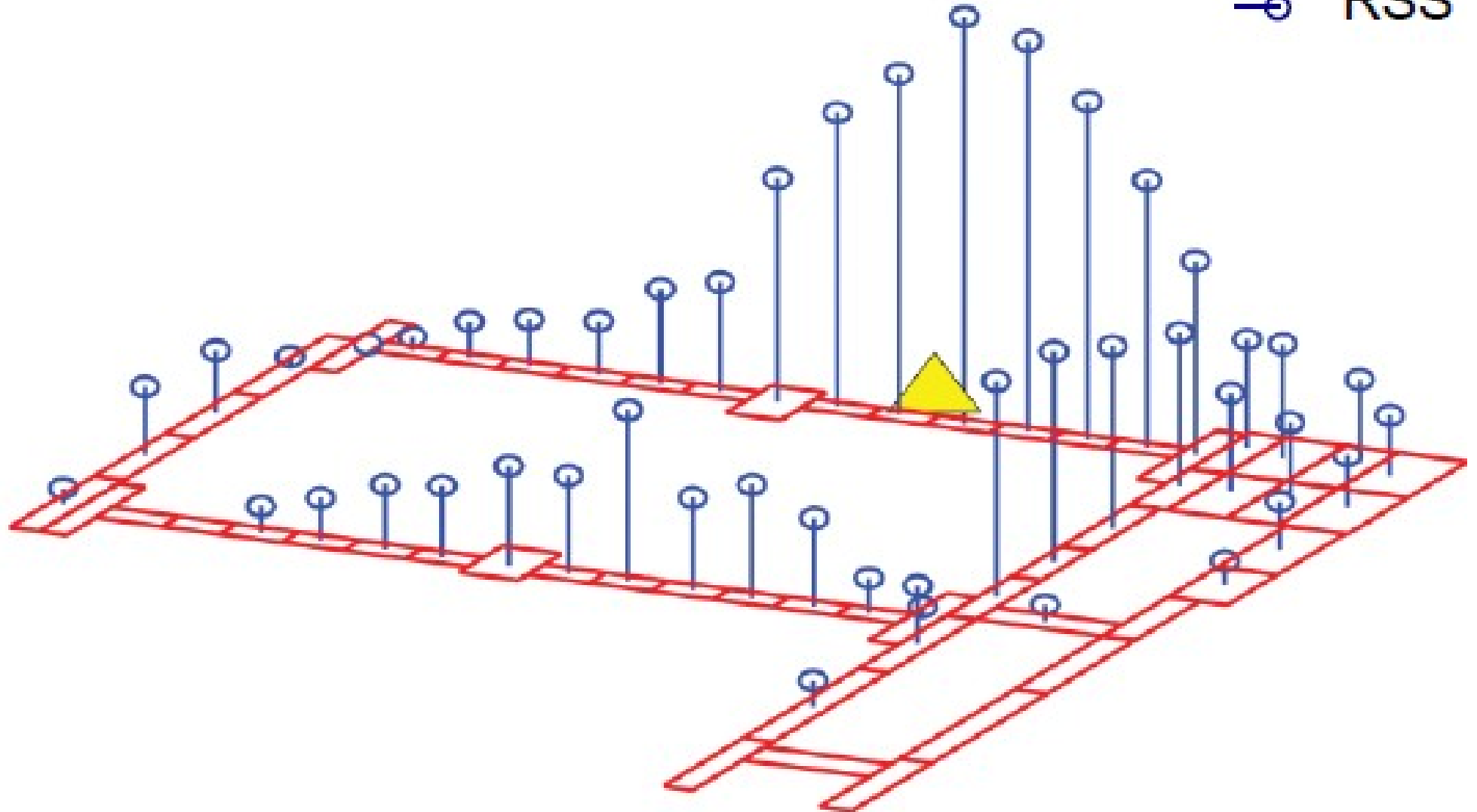
Técnicas de Localização – Trilateração



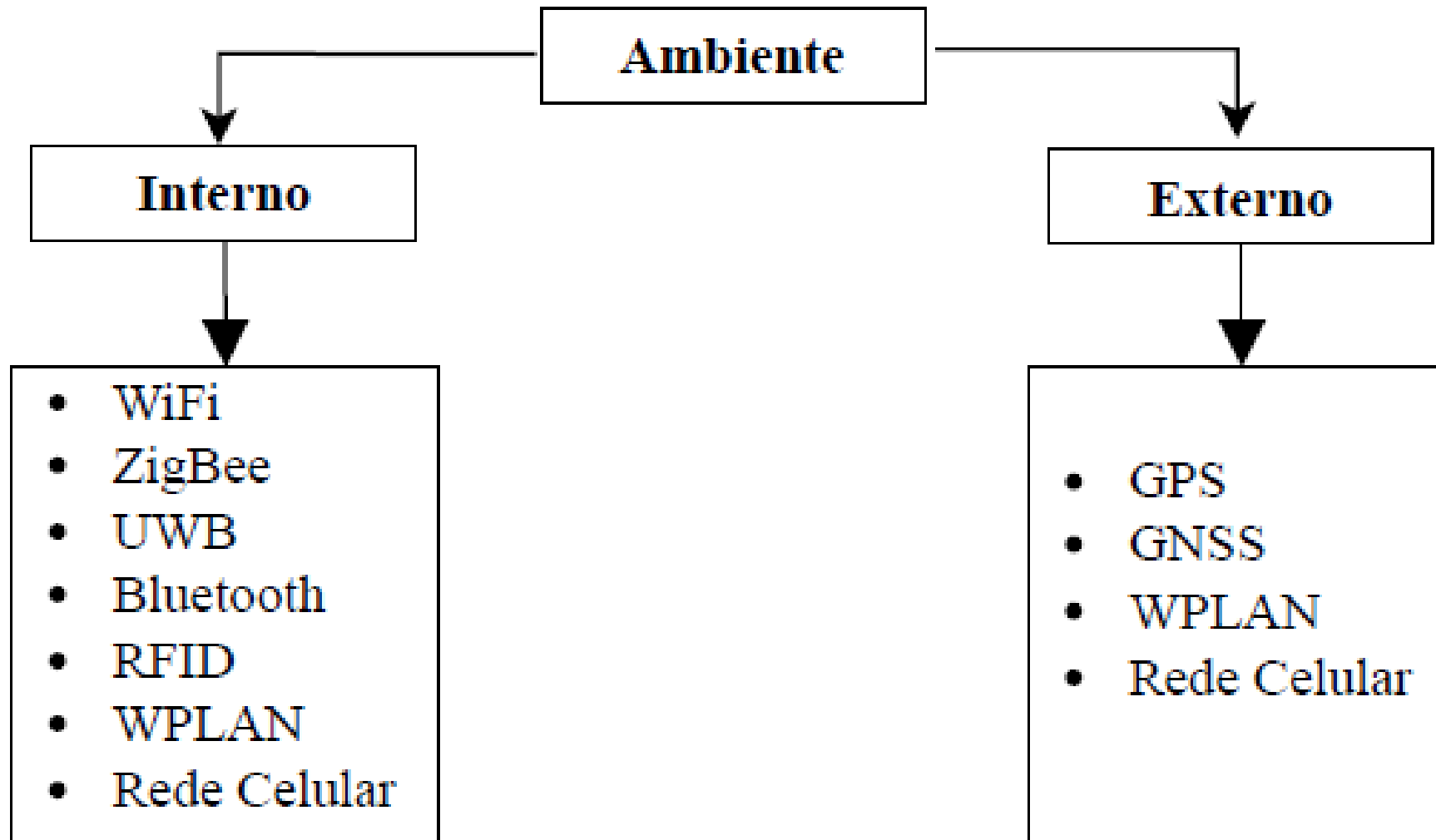
Técnicas de Localização – Triangulação



Técnicas de Localização – *Fingerprint*



Tecnologias de Comunicação



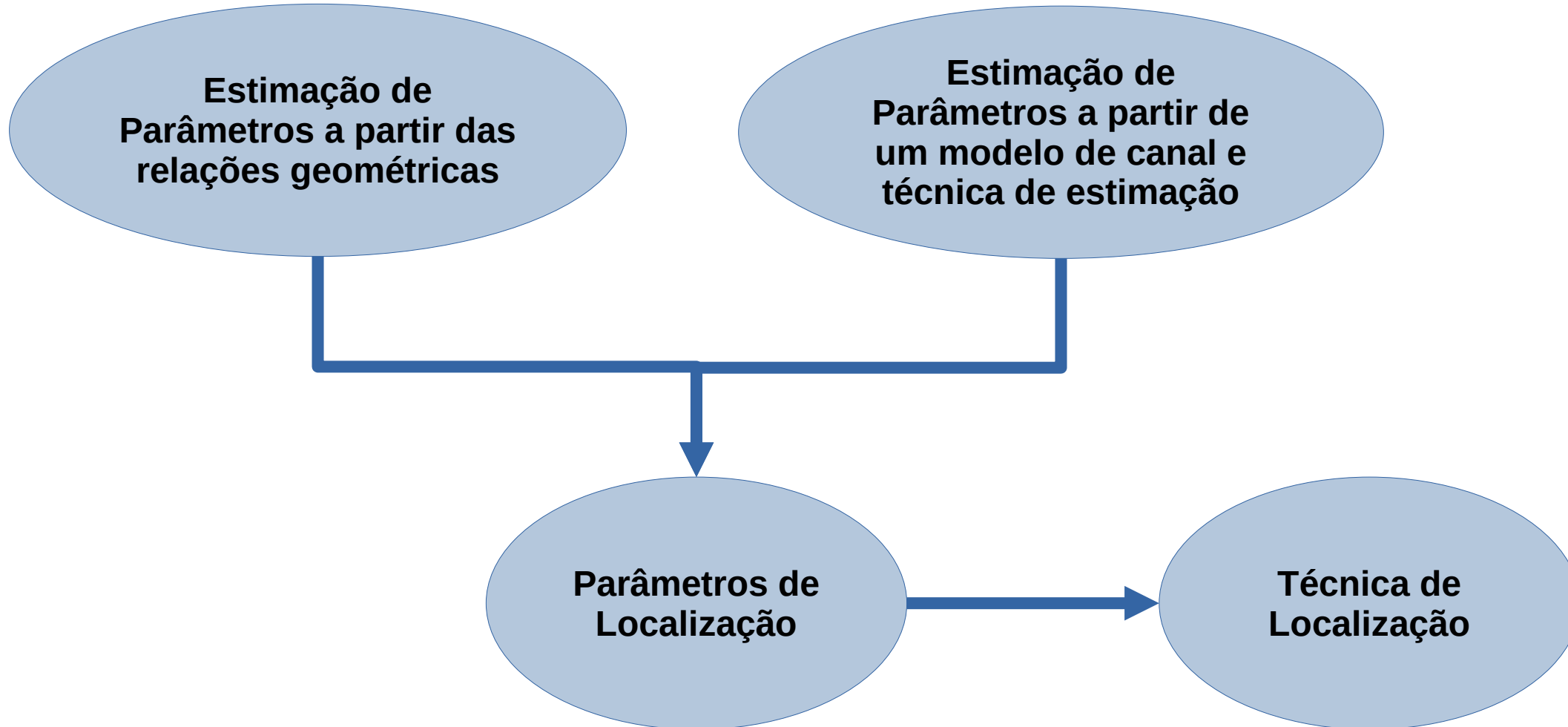
Tecnologias de Comunicação

Tecn.	Descrição	Parâmetros	Técnicas	Vantagens	Desvant.	Acurácia
WiFi	Usa os pontos de acesso do ambiente para estimar a localização.	AoA/AoD; ToA; TDoA; RSS;	Triangulação; <i>Fingerprint</i> .	Estrutura de comunicação já existente.	Manutenção da base de dados para <i>Fingerprint</i> .	Ambiente interno: 2 a 3 m
<i>ZigBee</i>	Padrão de comunicação comumente encontrado em equipamentos IoT.	AoA/AoD; ToA; TDoA; RSS.	Triangulação; Trilateração.	Baixo consumo energético;	Infraestrutura extra; Indisponibilidade nos <i>smartphones</i> .	Ambiente interno: 2 a 5 m
UWB	Equipamento que provê sinais com alta largura de banda e alta acurácia.	AoA/AoD; ToA; TDoA; RSS.	Triangulação; Trilateração; <i>Fingerprint</i> .	Baixo consumo energético; Alta acurácia.	Infraestrutura extra; Alto custo; Indisponibilidade nos <i>smartphones</i> .	Ambiente interno: 0.1 a 0.5 m
Beacons BLE	Pequenos equipamentos <i>Bluetooth</i> de baixo custo e baixo consumo energético.	AoA/AoD; ToA; TDoA; RSS.	Triangulação; <i>Fingerprint</i> .	Facilidade na implantação; Baixo consumo energético.	Requer estrutura própria; Curto alcance.	Ambiente interno: 0,8 a 2 m

Tecnologias de Comunicação

Tecn.	Descrição	Parâmetros	Técnicas	Vantagens	Desvant.	Acurácia
RFID	Etiquetas que transmitem um ID a um receptor.	RSS.	Trilateração; Triangulação.	Facilidade de implantação.	Requer estrutura própria; Alto custo dos leitores de etiquetas.	Ambiente interno: 2 a 5 m
LPWAN	Tecnologia que oferece baixo consumo energético e longo alcance.	AoA/AoD; TDoA; RSS.	Triangulação; Trilateração; <i>Fingerprint</i> .	Baixo consumo energético; Longo alcance.	Infraestrutura extra; Indisponibilidade nos <i>smartphones</i> .	Ambiente interno e externo: 2.5 a 6 m
GPS / GNSS	Satélites espaciais gerenciados por um centro de controle em terra.	ToA; RSS.	Trilateração.	Infraestrutura pronta; Receptores de baixo custo nos <i>smartphones</i> ;	Alto custo para melhorar acurácia;	Ambiente externo: 10 a 15 m;
Rede Celular	Usa os sinais provenientes das redes LTE da telefonia móvel.	AoA/AoD; ToA; TDoA; RSS.	Triangulação; Trilateração; Estimadores, como NLS e MLE.	Infraestrutura pronta; Disponível em ambiente interno e externo.	Baixa acurácia em ambiente interno;	Ambiente interno e externo: acima de 2 m

Localização Usando a Rede Celular



Parâmetros – Relações Geométricas

LoS

$$\tau_i = \frac{\|\mathbf{b}_i - \mathbf{m}\|}{c} + n_i,$$

$$\theta_i^{az} = \text{atan} \left(\frac{b_{i,y} - m_y}{b_{i,x} - m_x} \right) + n_i,$$

$$\theta_i^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{b_{i,z} - m_z}{\sqrt{(b_{i,x} - m_x)^2 + (b_{i,y} - m_y)^2}} \right) + n_i,$$

$$\phi_i^{az} = \text{atan} \left(\frac{m_y - b_{i,y}}{m_x - b_{i,x}} \right) + n_i,$$

$$\phi_i^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{m_z - b_{i,z}}{\sqrt{(m_x - b_{i,x})^2 + (m_y - b_{i,y})^2}} \right) + n_i.$$

NLoS

$$\tau_i = \frac{\|\mathbf{s}_i - \mathbf{b}\| + \|\mathbf{s}_i - \mathbf{m}\|}{c} + n_i,$$

$$\theta_i^{az} = \text{atan} \left(\frac{s_{i,y} - m_y}{s_{i,x} - m_x} \right) + n_i,$$

$$\theta_i^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{s_{i,z} - m_z}{\sqrt{(s_{i,x} - m_x)^2 + (s_{i,y} - m_y)^2}} \right) + n_i,$$

$$\phi_i^{az} = \text{atan} \left(\frac{s_{i,y} - b_y}{s_{i,x} - b_x} \right) + n_i,$$

$$\phi_i^{el} = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left(\frac{s_{i,z} - b_z}{\sqrt{(s_{i,x} - b_x)^2 + (s_{i,y} - b_y)^2}} \right) + n_i.$$

Método de *Taylor*

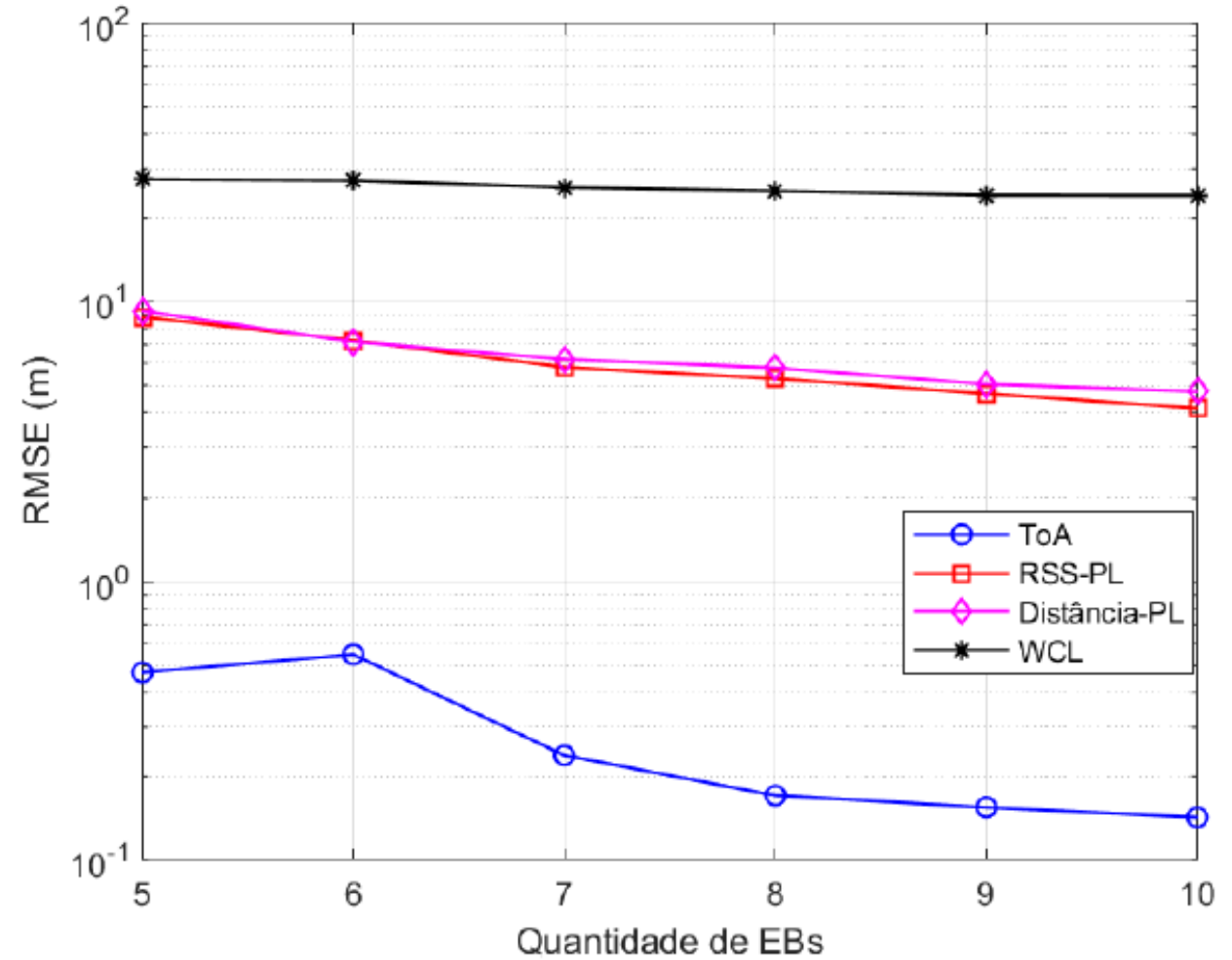
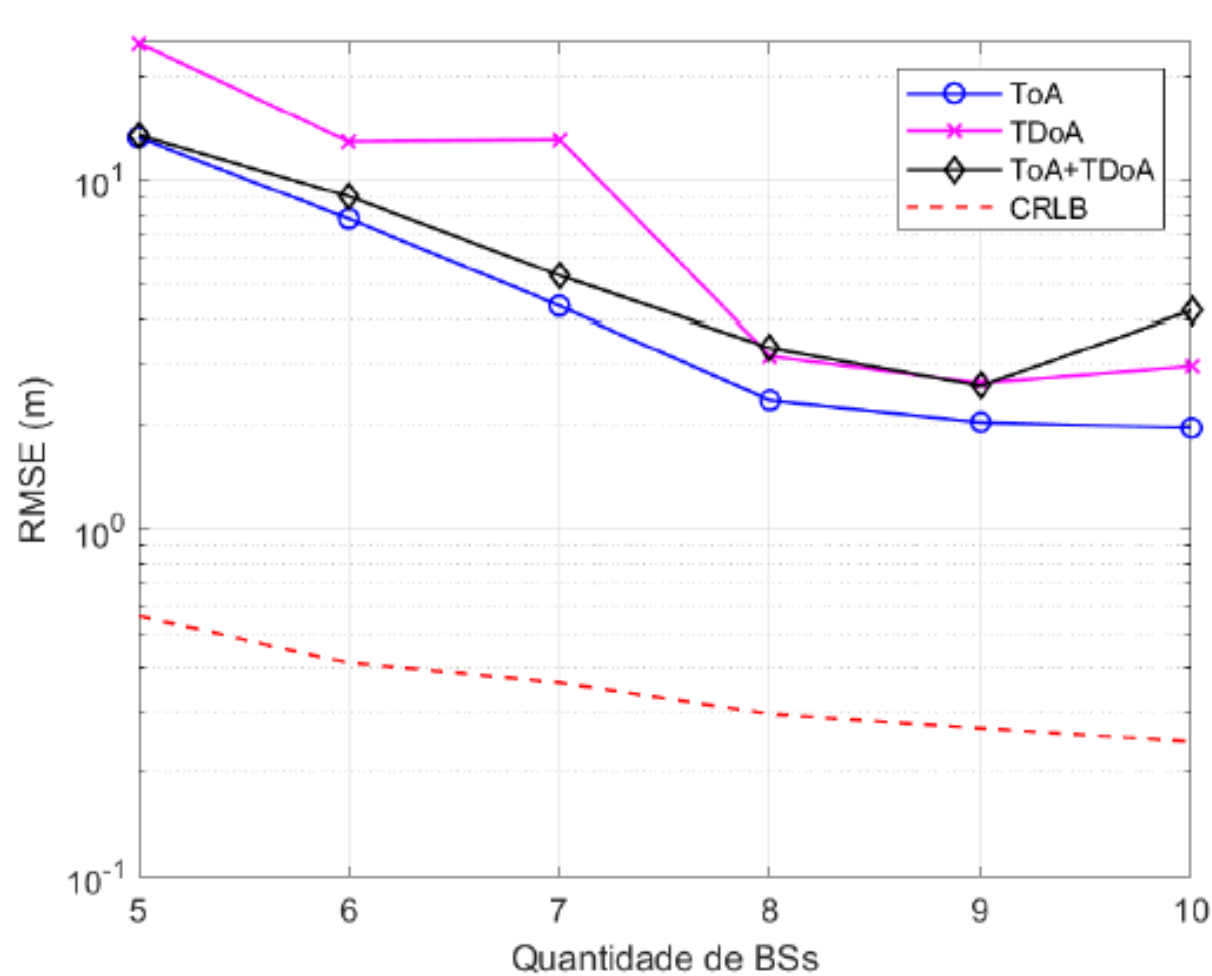
Algoritmo 1: ESTIMADOR BASEADO NO MÉTODO DE TAYLOR

Entrada: $Tol, \Sigma, \widehat{\mathbf{m}}, \mathbf{g}, Max, \mathbf{b}, L$

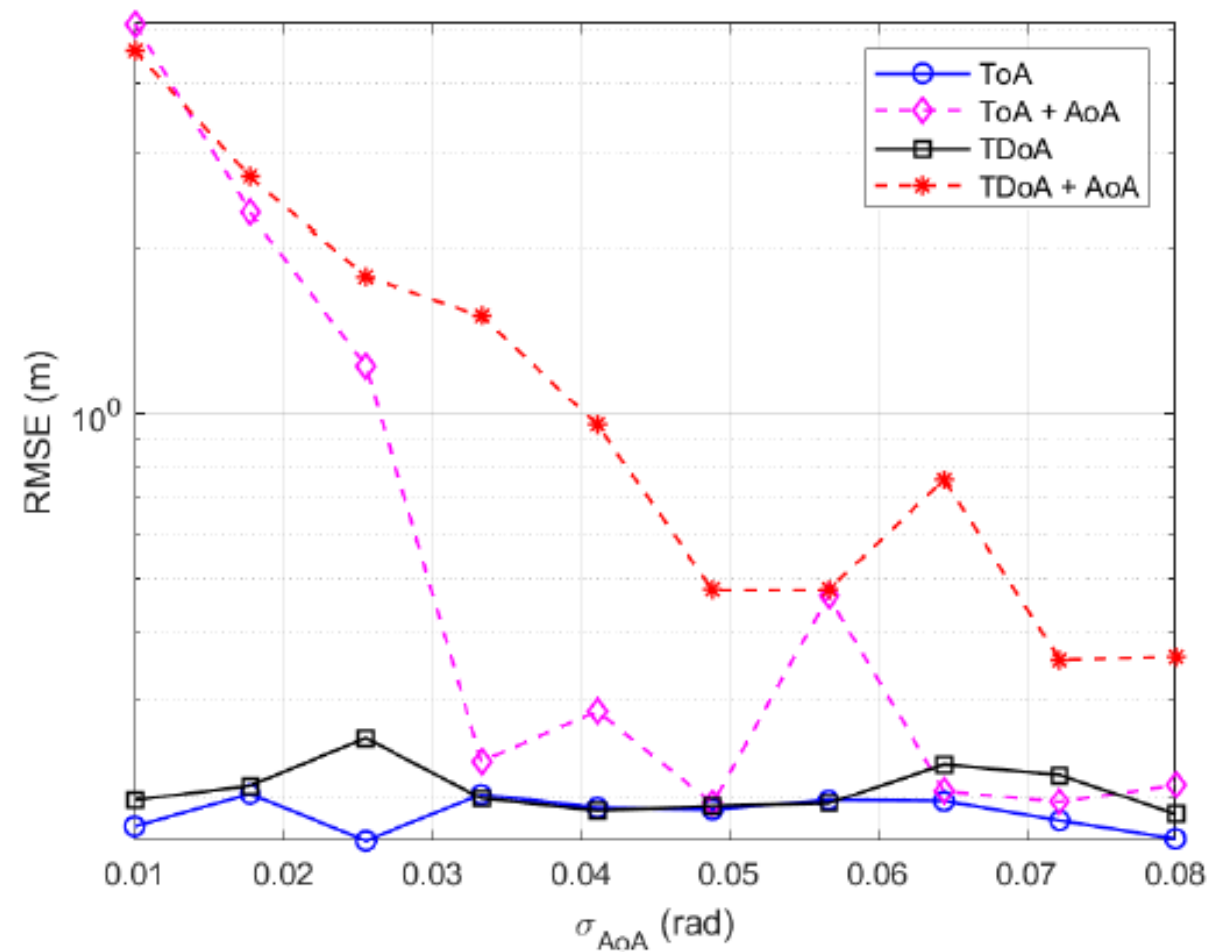
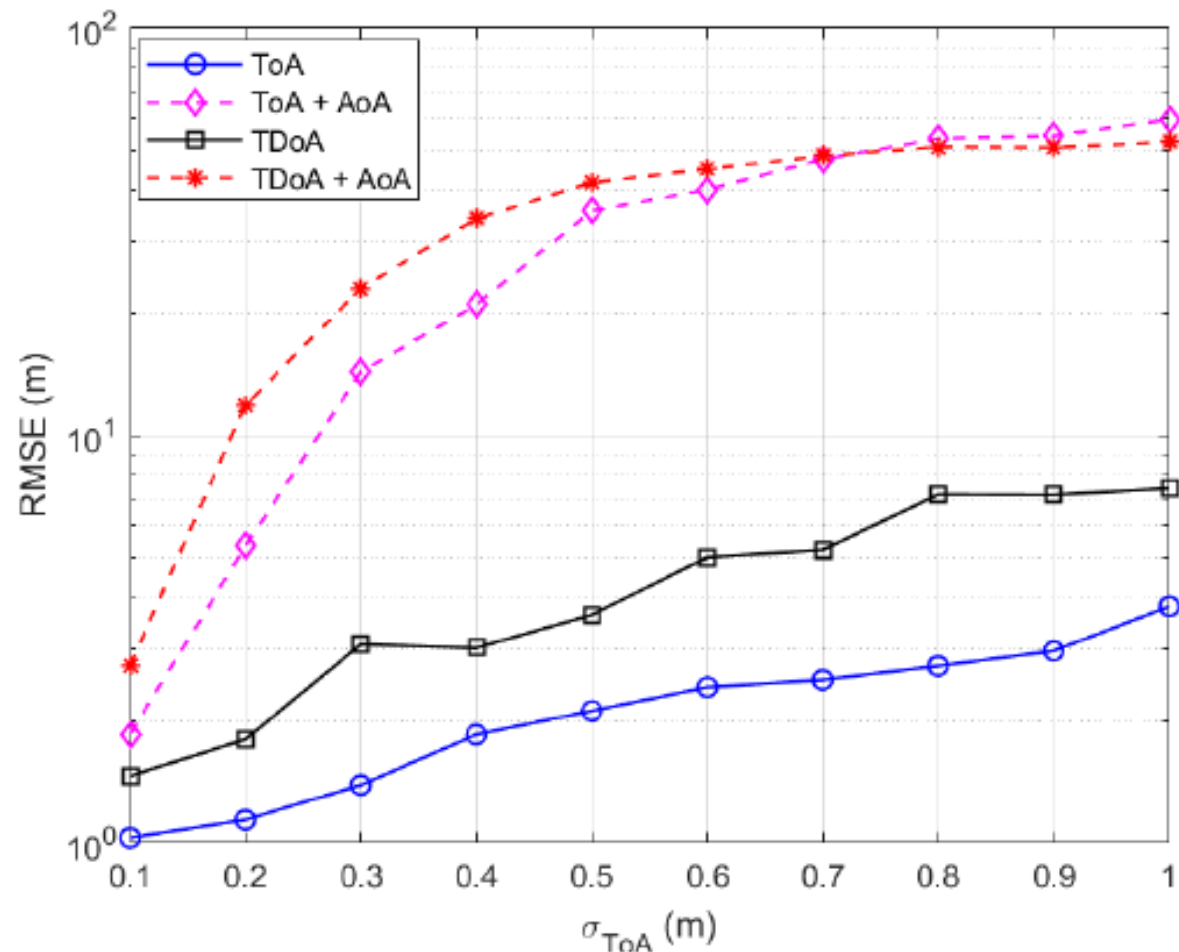
Saída: $\widehat{\mathbf{m}}$

```
1 início
2   para  $o \leftarrow 1$  até  $Max$  faça
3     para  $i \leftarrow 1$  até  $L$  faça
4        $f_i(\widehat{\mathbf{m}}) \leftarrow \|\widehat{\mathbf{x}} - \mathbf{b}_i\|$ 
5        $\mathbf{J}_{i,1:3} \leftarrow \left[ \frac{\partial f_i(\widehat{\mathbf{m}})}{\partial \widehat{m}_x}, \frac{\partial f_i(\widehat{\mathbf{m}})}{\partial \widehat{m}_y}, \frac{\partial f_i(\widehat{\mathbf{m}})}{\partial \widehat{m}_z} \right]$ 
6     fim
7      $\mathbf{mAnt} \leftarrow \widehat{\mathbf{m}}$ 
8      $\widehat{\mathbf{m}} \leftarrow \widehat{\mathbf{m}} + (\mathbf{J}^T \Sigma^{-1} \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \Sigma^{-1} [\mathbf{g} - \mathbf{f}(\widehat{\mathbf{m}})]$ 
9      $\varepsilon \leftarrow \|\mathbf{mAnt} - \widehat{\mathbf{m}}\|$ 
10    se  $\varepsilon \leq Tol$  então
11      Interrompa
12    fim
13  fim
14  retorna  $\widehat{\mathbf{m}}$ 
15 fim
```

Localização Usando a Rede Celular - LoS



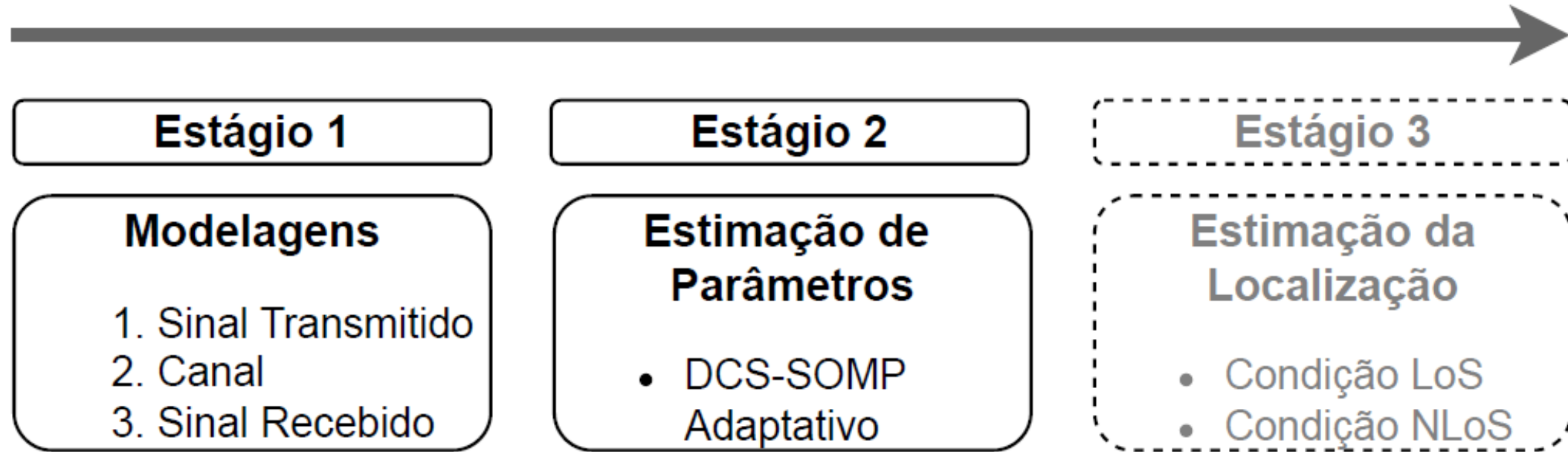
Localização Usando a Rede Celular – LoS



Localização Usando a Rede Celular

Parâmetros	Condição de Propagação	Quantidade de BSs	Configuração da Antena	Técnica	Dimensão da Localização	Esforço Computacional	Acurácia Estimada	Aplicações Potenciais
ToA	LoS	>2	Qualquer	Trilateração	2D	Baixo	Baixa	Ambiente urbanos e rurais: Navegação veicular
AoD/AoA	LoS	>1	Unidimensional	Triangulação	2D	Baixo	Baixa	Ambientes externos e internos: Navegação veicular; Marketing
AoD/AoA	LoS	>1	Bidimensional	Triangulação	3D	Médio	Baixa	Ambientes externos e internos: Navegação veicular; Marketing
ToA+AoD/AoA	LoS	>0	Unidimensional	Relação Geométrica	2D	Baixo	Média	Agricultura inteligente; Navegação em ambientes externos
ToA+AoD/AoA	LoS	>0	Bidimensional	Relação Geométrica	3D	Médio	Média	Agricultura inteligente; Navegação em ambientes internos
AoD+AoA	LoS/NLoS	>1	Unidimensional MIMO	Otimização / Relação Geométrica	2D	Médio	Média	Navegação de pedestres em ambientes externos; veículos autônomos
AoD+AoA	LoS/NLoS	>1	Bidimensional MIMO	Otimização / Relação Geométrica	3D	Alto	Média	Navegação de pedestres em ambientes internos, como edifícios
ToA+AoD+AoA	LoS/NLoS	>0	Unidimensional MIMO	Otimização / Relação Geométrica	2D	Médio	Alta	Aplicações de alta acurácia onde a altura não é importante
ToA+AoD+AoA	LoS/NLoS	>0	Bidimensional MIMO	Otimização / Relação Geométrica	3D	Alto	Alta	Ambientes industriais complexos; Veículos autônomos

Localização em Rede 5G



Localização em Rede 5G – Modelagem do Canal

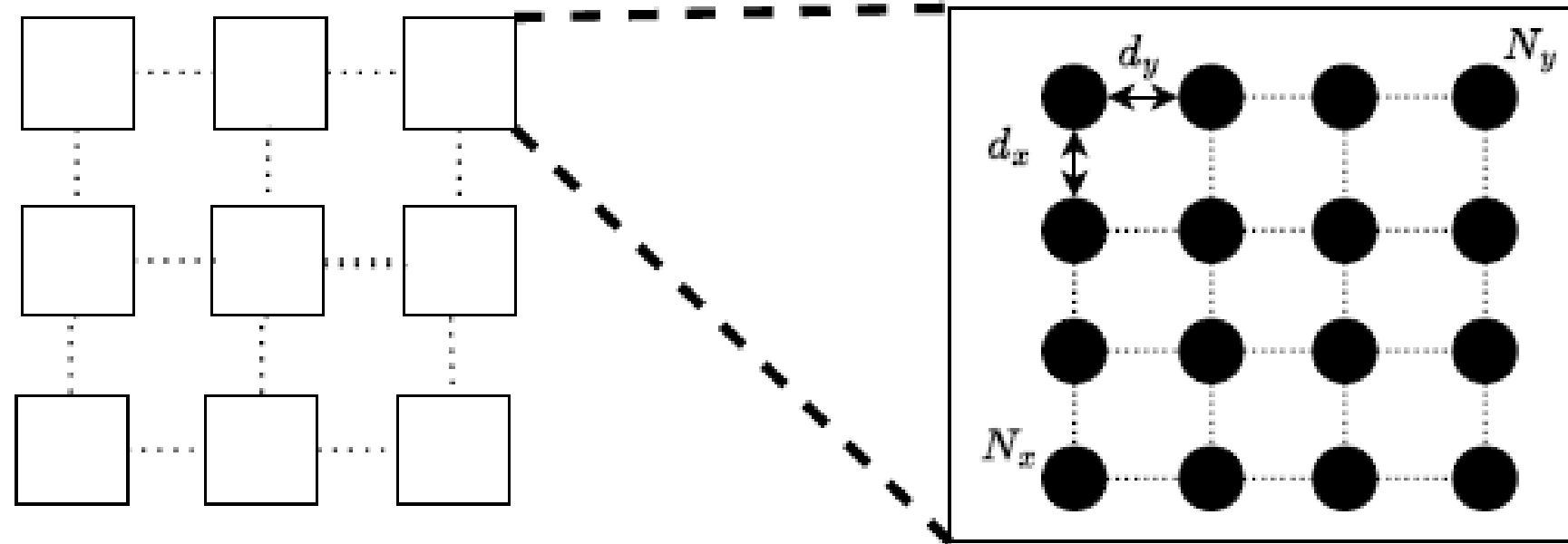
- 1) Definição do Ambiente
- 2) Definição do Arranjo de antenas
- 3) A Frequência da portadora (mmWave)

Amb.	InO	InF				
Carac.		InF-SL	InF-DL	InF-SH	InF-DH	InF-HH
Descrição	Escritório	Poucos obstáculos BS baixa	Muitos obstáculos BS baixa	Poucos obstáculos BS alta	Muitos obstáculos BS alta	BS alta UE alto
Tamanho (m ²)	≤ 6000	20 ≤ m ² ≤ 160000				
h _{amb} (m)	3	≤ 25	≤ 15	≤ 25	≤ 15	≤ 25
h _{obs} (m)	N/A	h _{obs} ≤ 10 (m) e h _{obs} ≤ l _{obs}				
h _{BS} (m)	3	≤ h _{obs}		> h _{obs}		
h _{UE} (m)	1	≤ h _{obs}				> h _{obs}
d _{OBS} (%)	N/A	< 40	≥ 40	< 40	≥ 40	N/A
Condição	LoS/NLoS	LoS/NLoS	LoS/NLoS	LoS/NLoS	LoS/NLoS	LoS

Localização em Rede 5G – Modelagem do Canal

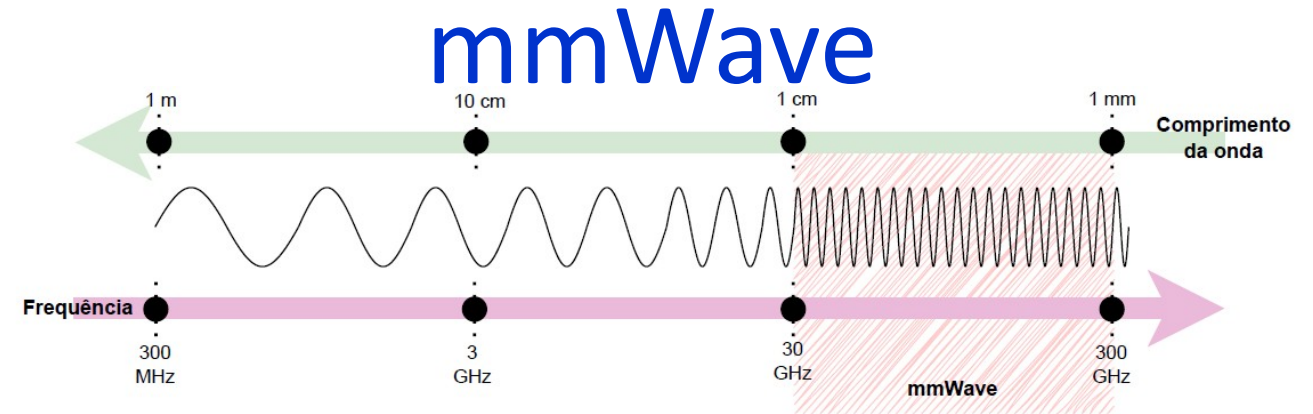
- 1) Definição do Ambiente
- 2) **Definição do Arranjo de antenas**
- 3) A Frequência da portadora (mmWave)

Planar – URA



Localização em Rede 5G – Modelagem do Canal

- 1) Definição do Ambiente
- 2) Definição do Arranjo de antenas
- 3) **A Frequência da portadora (mmWave)**



1. Aumenta a resolução Temporal
2. Aumenta a Esparsidade da resposta do canal
3. Favorece a estimação de ToA/AoA
4. Diminui a quantidade de múltiplas reflexões
5. Está alinhado com o modelo de propagação de salto único

Localização em Rede 5G – Modelagem do Canal

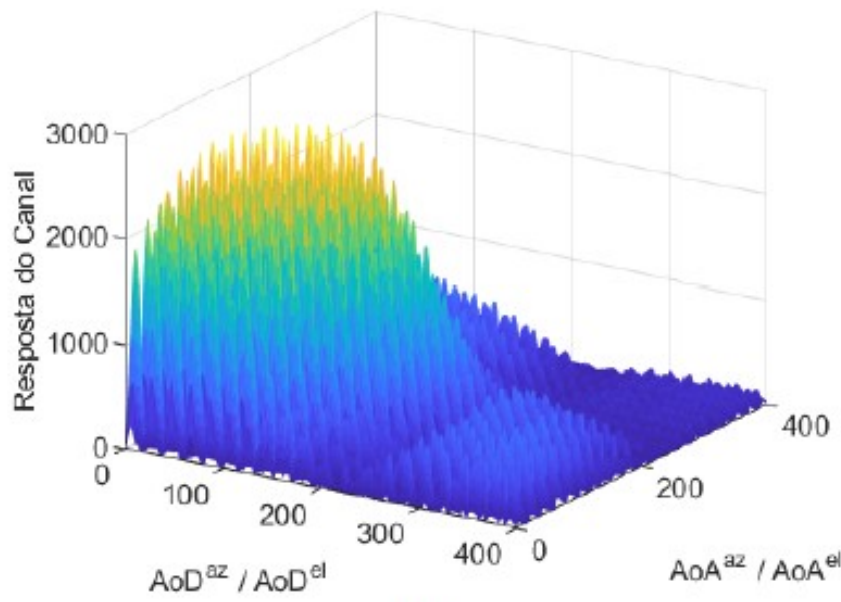
Modelo do Canal (MIMO 3GPP) : $\mathbf{H}[n] = \mathbf{A}_r[n] \mathbf{\Gamma}[n] \mathbf{A}_t^H[n]$

Vetor resposta : $A_r^{URA} = [1, e^{j1[\Theta]+1[\Theta]}, \dots, e^{j(N_x-1)[\Theta]+(N_y-1)[\Theta]}]^T$

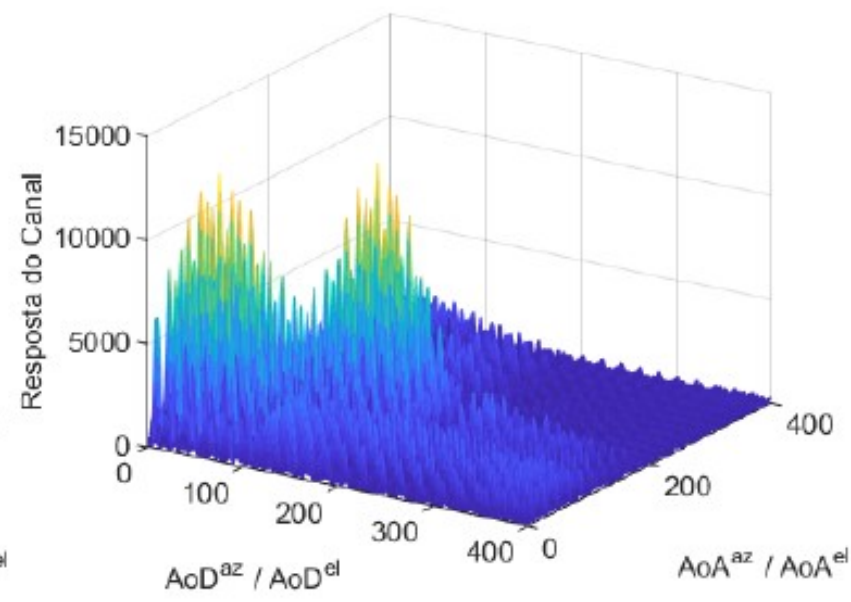
$$\Theta = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin(\theta^{el}) \cos(\theta^{az}) \text{ e } \Theta = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin(\theta^{el}) \cos(\theta^{az})$$

$$\mathbf{\Gamma}[n] = \sqrt{N_t N_r} \times \text{diag} \left\{ \frac{h_0}{\sqrt{\rho_0}} e^{\frac{-j2\pi n \tau_0}{NT_s}}, \dots, \frac{h_{L-1}}{\sqrt{\rho_{L-1}}} e^{\frac{-j2\pi n \tau_{L-1}}{NT_s}} \right\}$$

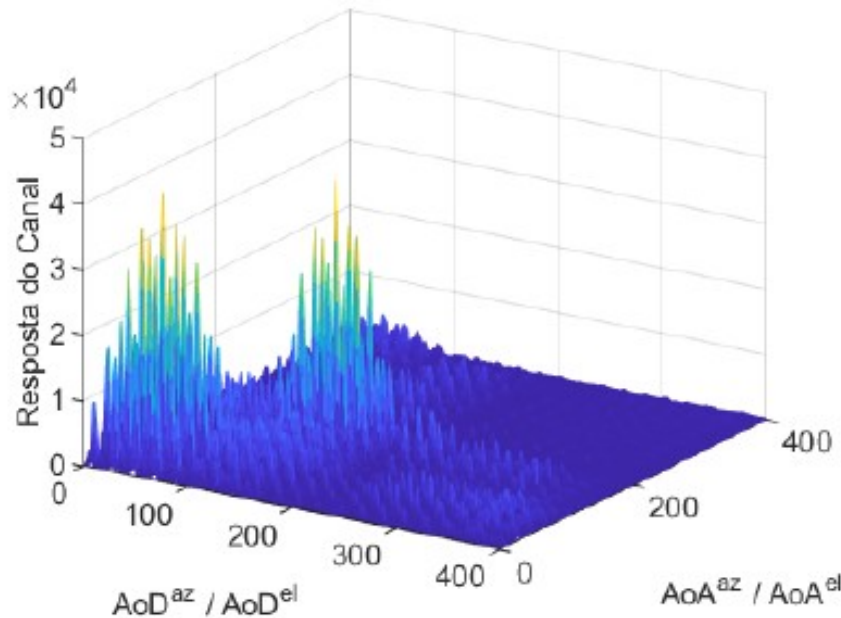
Resposta do Canal



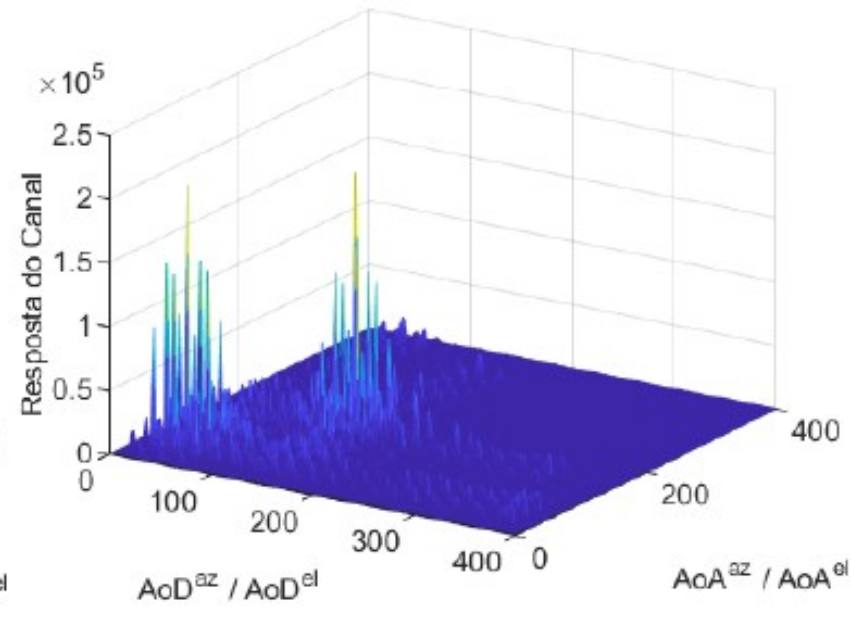
(a)



(b)



(c)



(d)

Localização em Rede 5G – Modelagem do Canal

Modelo da
transmissão :

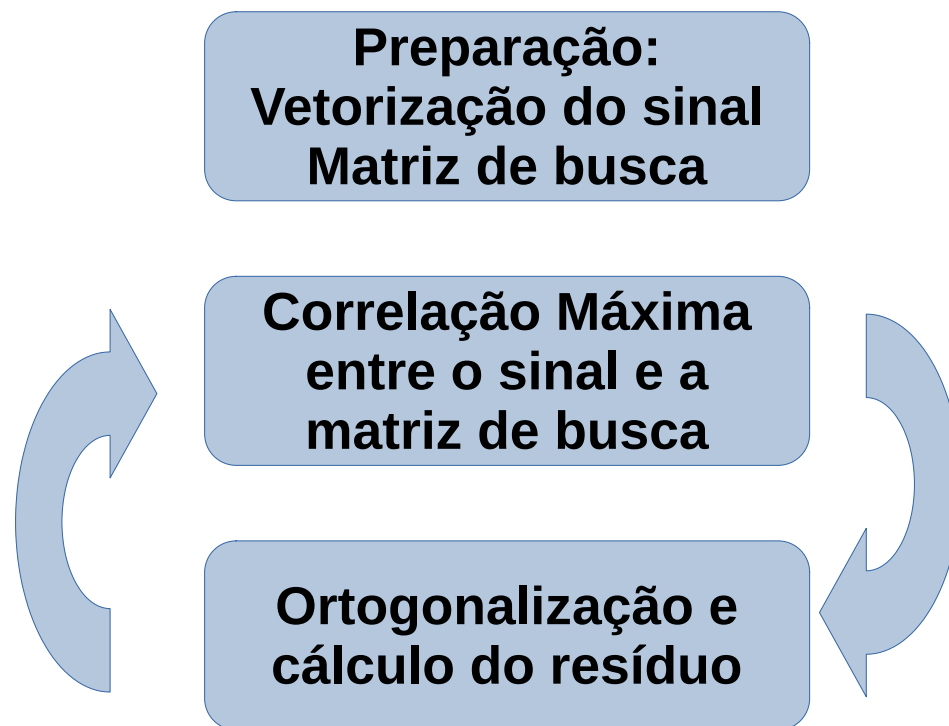
$$\mathbf{w}[n] = \mathbf{F}[n]\mathbf{x}^T[n]$$

Modelo do sinal
Recebido :

$$\mathbf{y}[n] = \mathbf{H}[n]\mathbf{w}[n] + \mathbf{n}[n]$$

Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros

DCS-SOMP



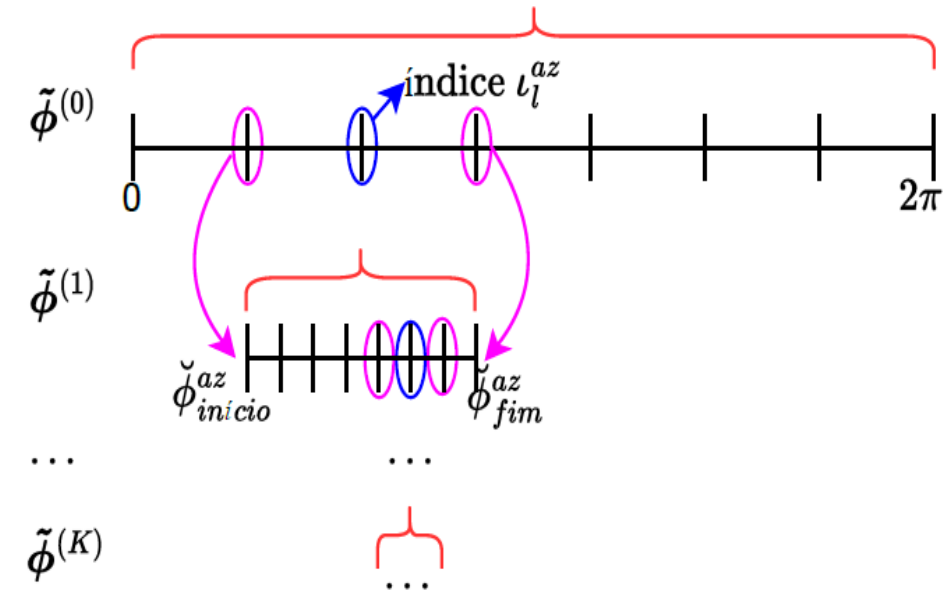
Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros

DCS-SOMP Adaptativo

**Preparação:
Vetorização do sinal
Matriz de busca**

**Correlação Máxima
entre o sinal e a
matriz de busca**

**Ortogonalização e
cálculo do resíduo**



Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros

$$\boldsymbol{\omega}^{(0)}[n] = (\mathbf{U}_t^{(0)} \mathbf{w}[n])^T \otimes \mathbf{U}_r^{(0)}$$

$$I_\phi^l = \frac{\tilde{h}_l}{q_{az} q_{el}}, \quad \iota_l^{az} = \left\lfloor \frac{I_\phi^l}{q_{az}} \right\rfloor, \quad \iota_l^{el} = I_\phi^l \bmod q_{el},$$

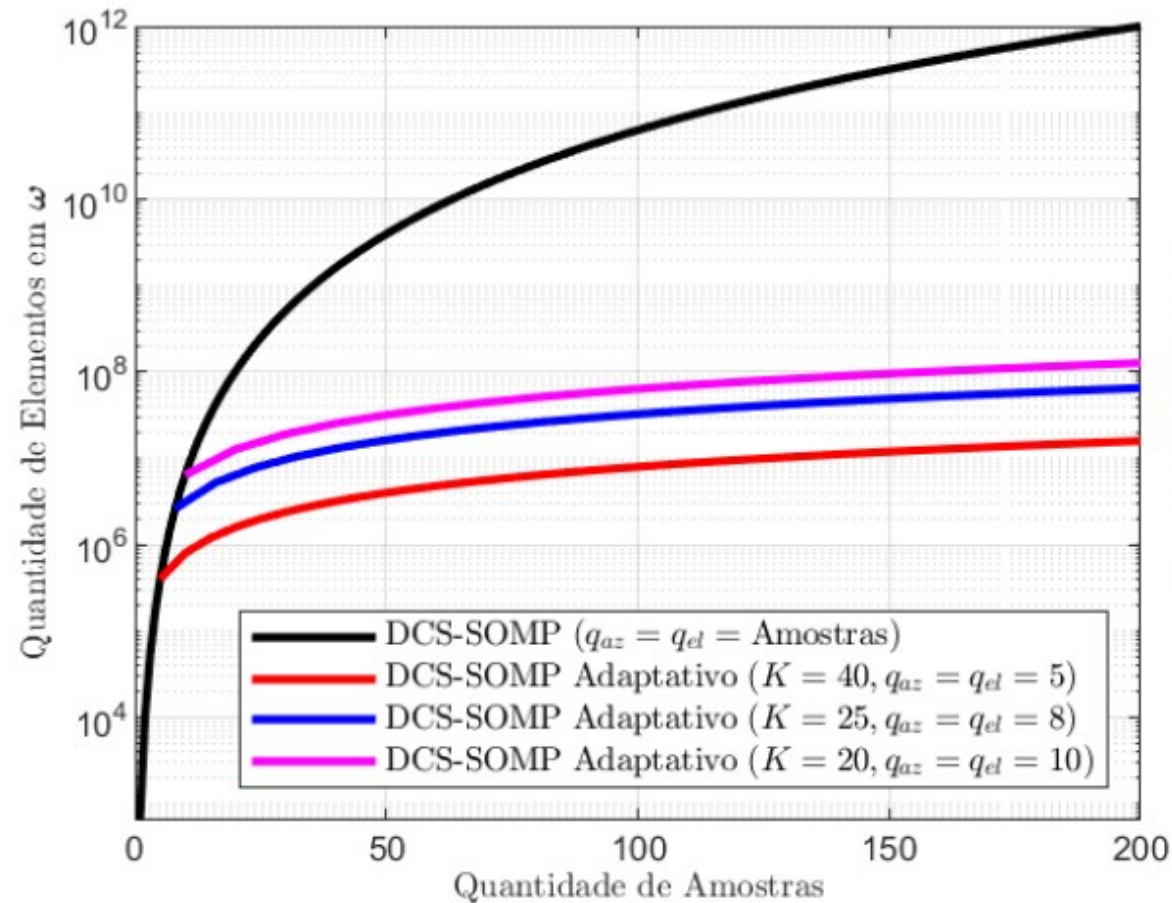
$$\tilde{h}_l = \underset{m=1, \dots, (q_{az} q_{el})^2}{\operatorname{argmax}} \sum_{n=1}^N \frac{|\boldsymbol{\omega}_m^H[n] \mathbf{R}_l[n]|}{\|\boldsymbol{\omega}_m[n]\|_2}$$

$$\phi_l^{az} = \tilde{\phi}_{\iota_l^{az}}^{(0)}, \quad \phi_l^{el} = \dot{\phi}_{\iota_l^{el}}^{(0)}.$$

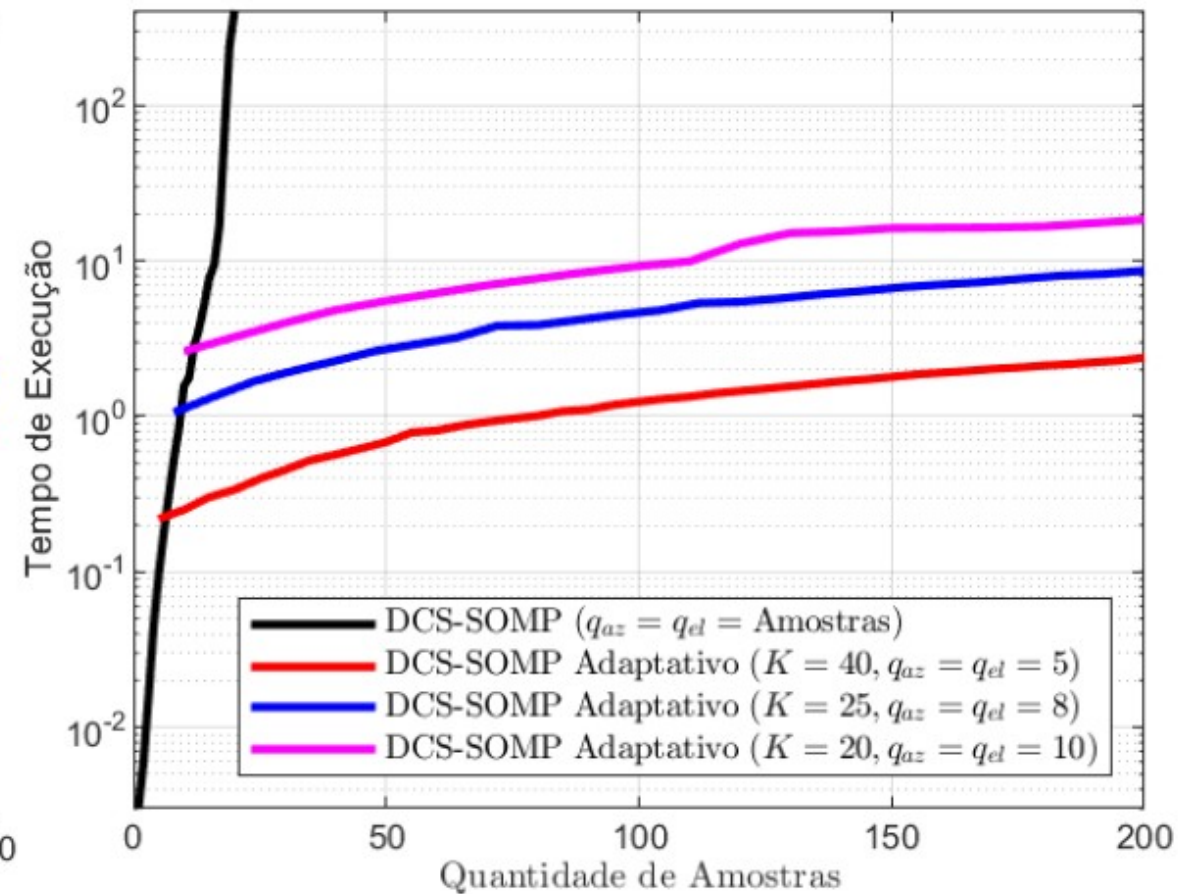
$$I_\theta^l = \tilde{h}_l - I_\phi^l q_{az} q_{el}, \quad \gamma_l^{az} = \left\lfloor \frac{I_\theta^l}{q_{az}} \right\rfloor, \quad \gamma_l^{el} = I_\theta^l \bmod q_{el},$$

$$\check{\phi}_{\text{início}}^{az} = \begin{cases} \tilde{\phi}_{\iota_l^{az}-1}^{(k-1)}, & \text{se } \iota_l^{az} > 1 \\ 0, & \text{se } \iota_l^{az} = 1 \end{cases} \quad \text{e} \quad \check{\phi}_{\text{fim}}^{az} = \begin{cases} \tilde{\phi}_{\iota_l^{az}+1}^{(k-1)}, & \text{se } \iota_l^{az} < q_{az} \\ q_{az}, & \text{se } \iota_l^{az} = q_{az} \end{cases}$$

Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros

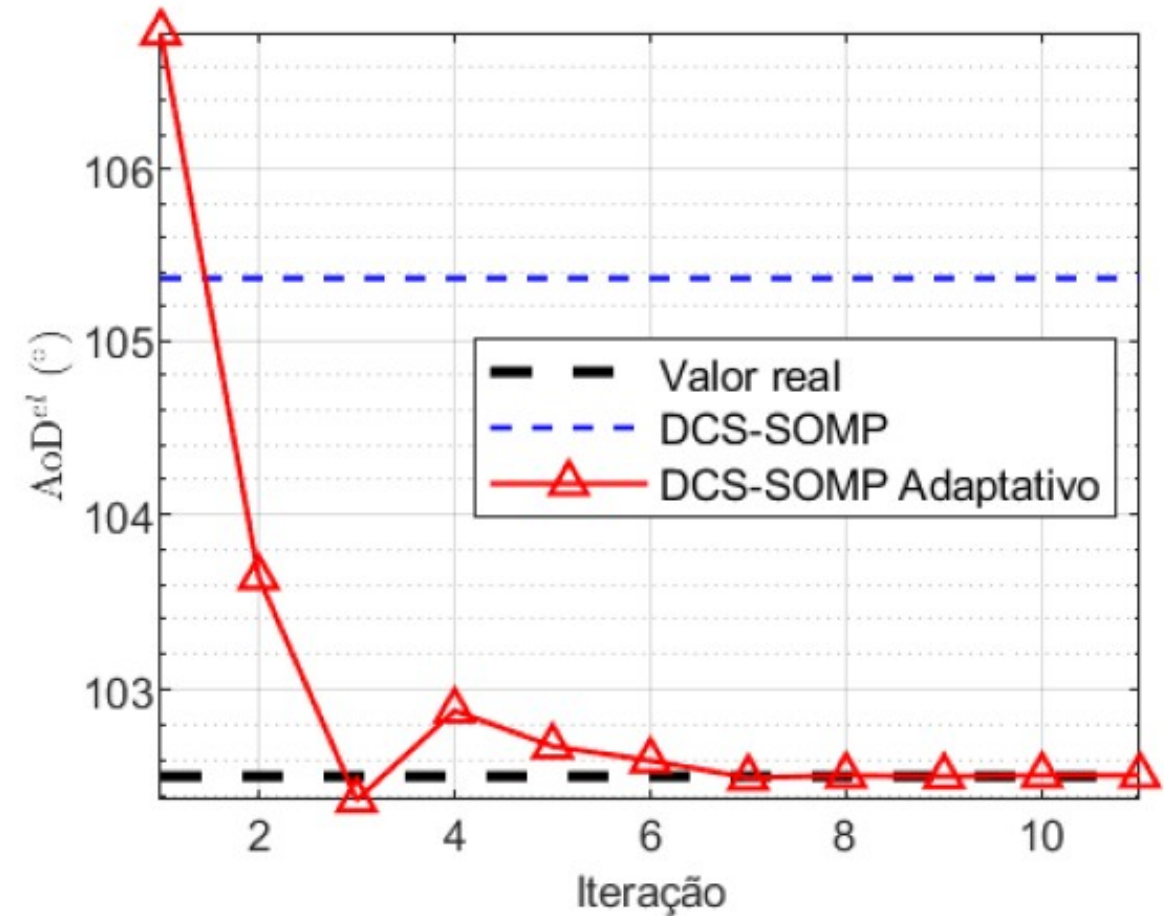
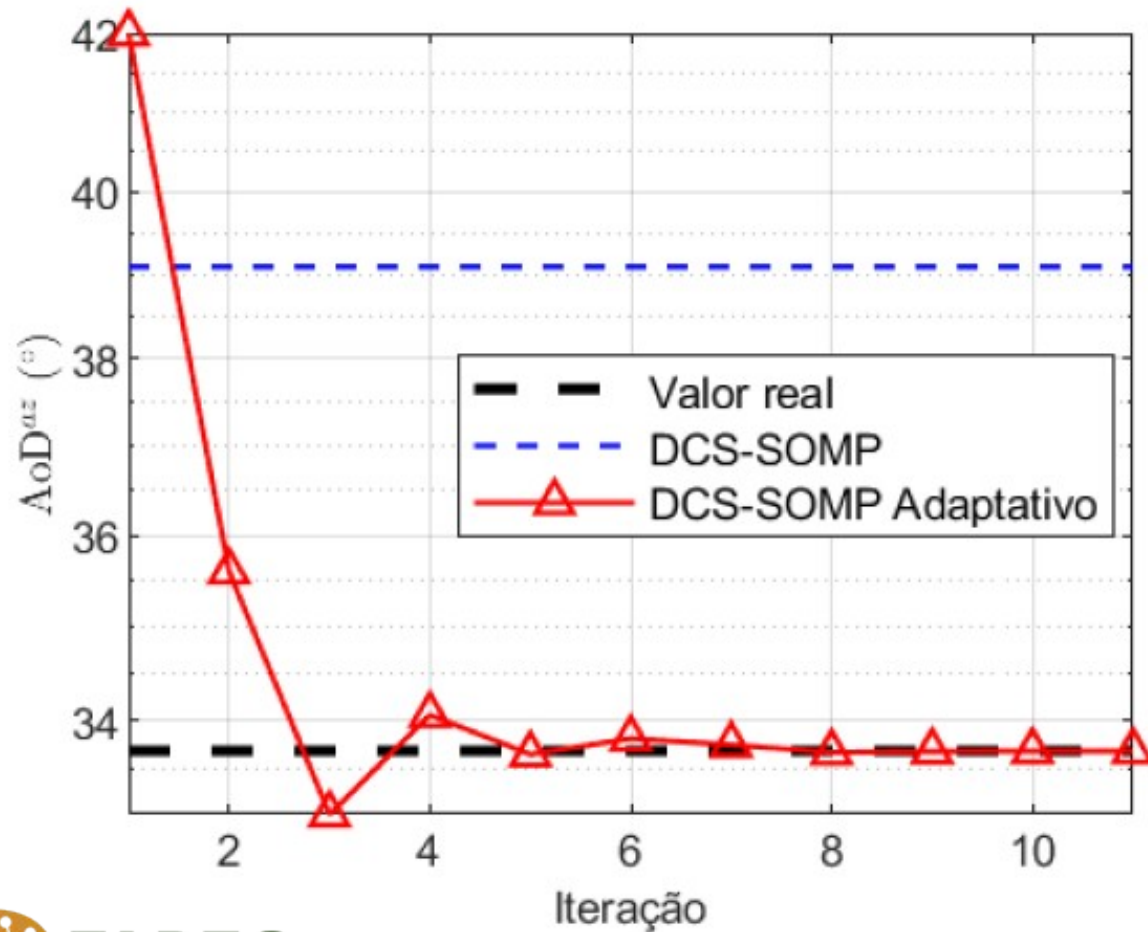


(a)

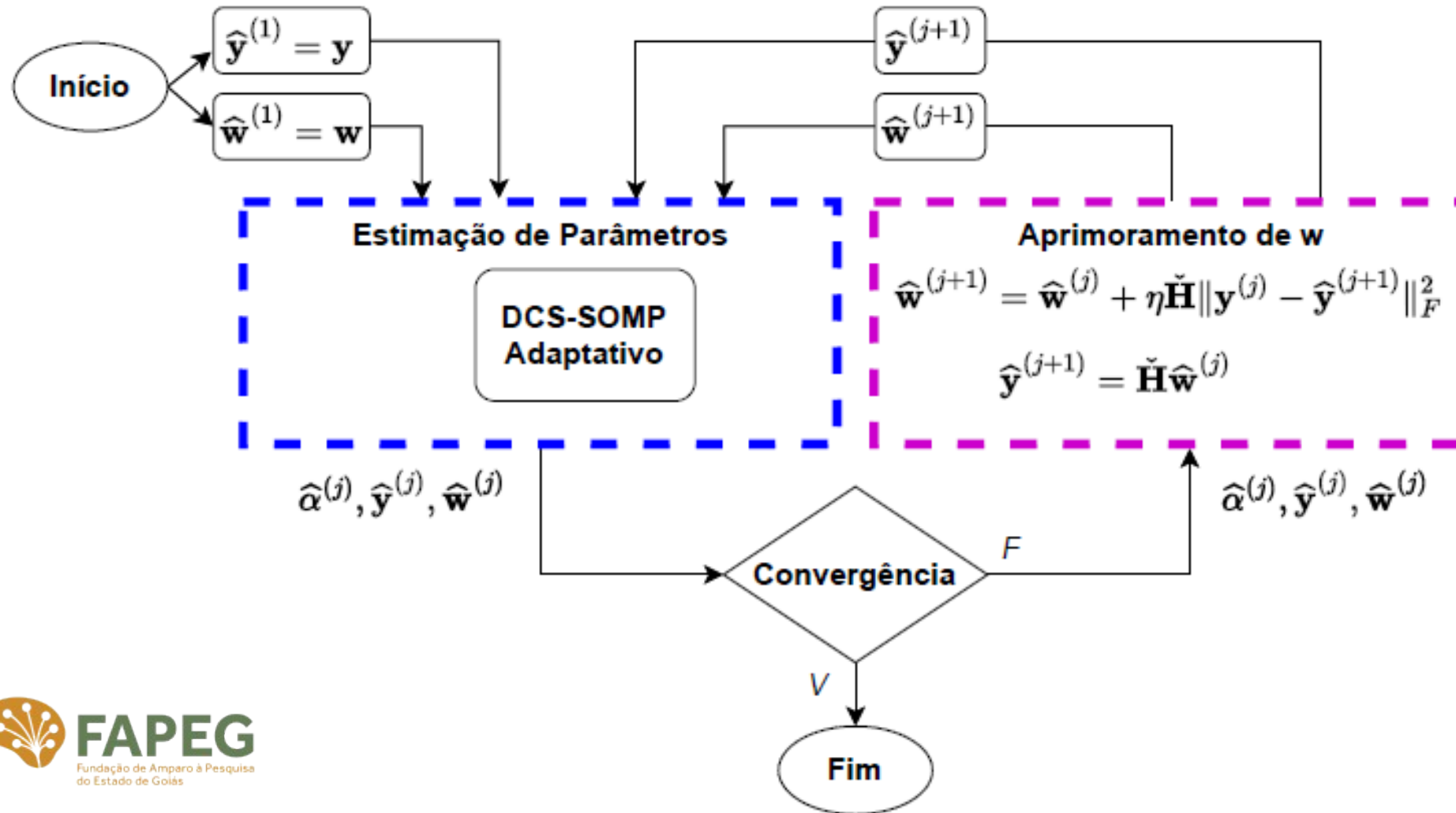


(b)

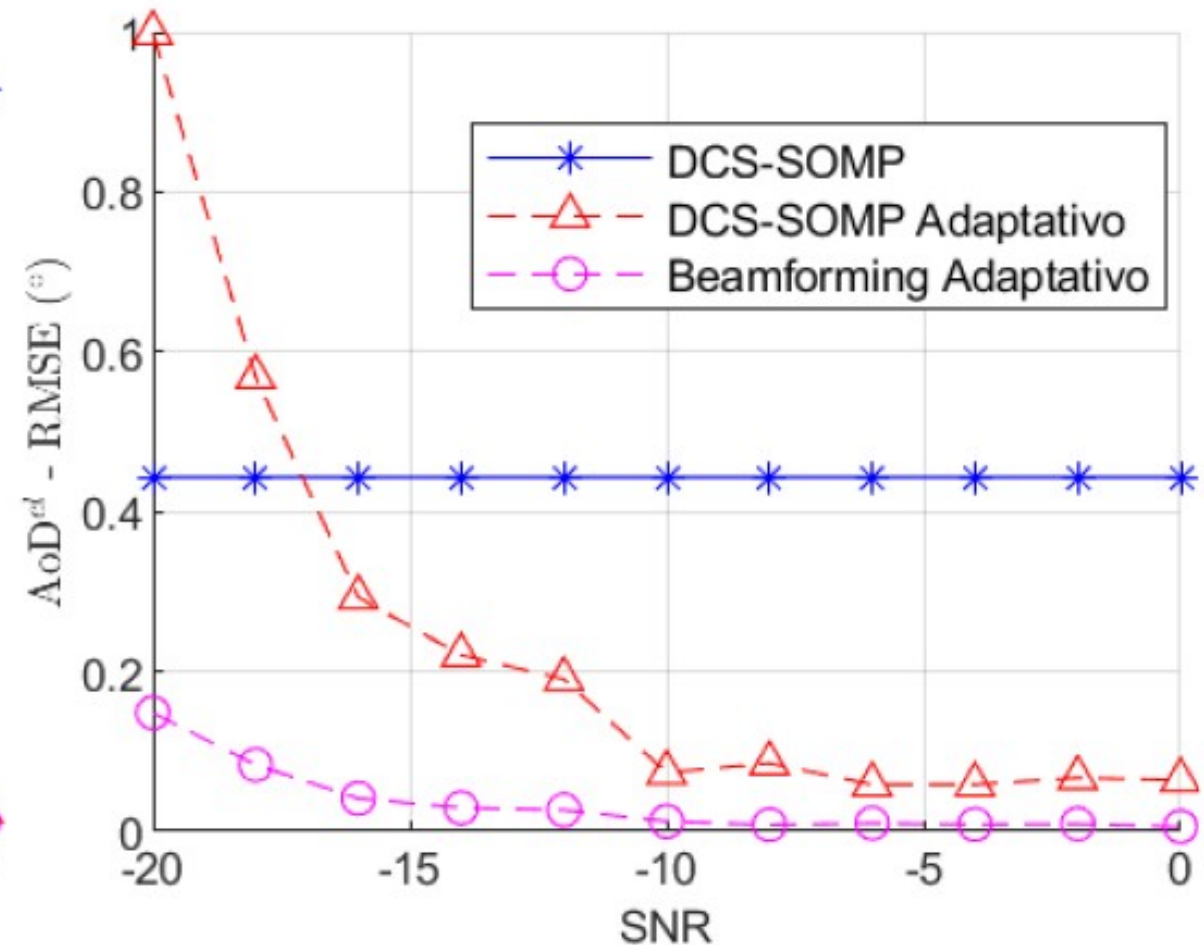
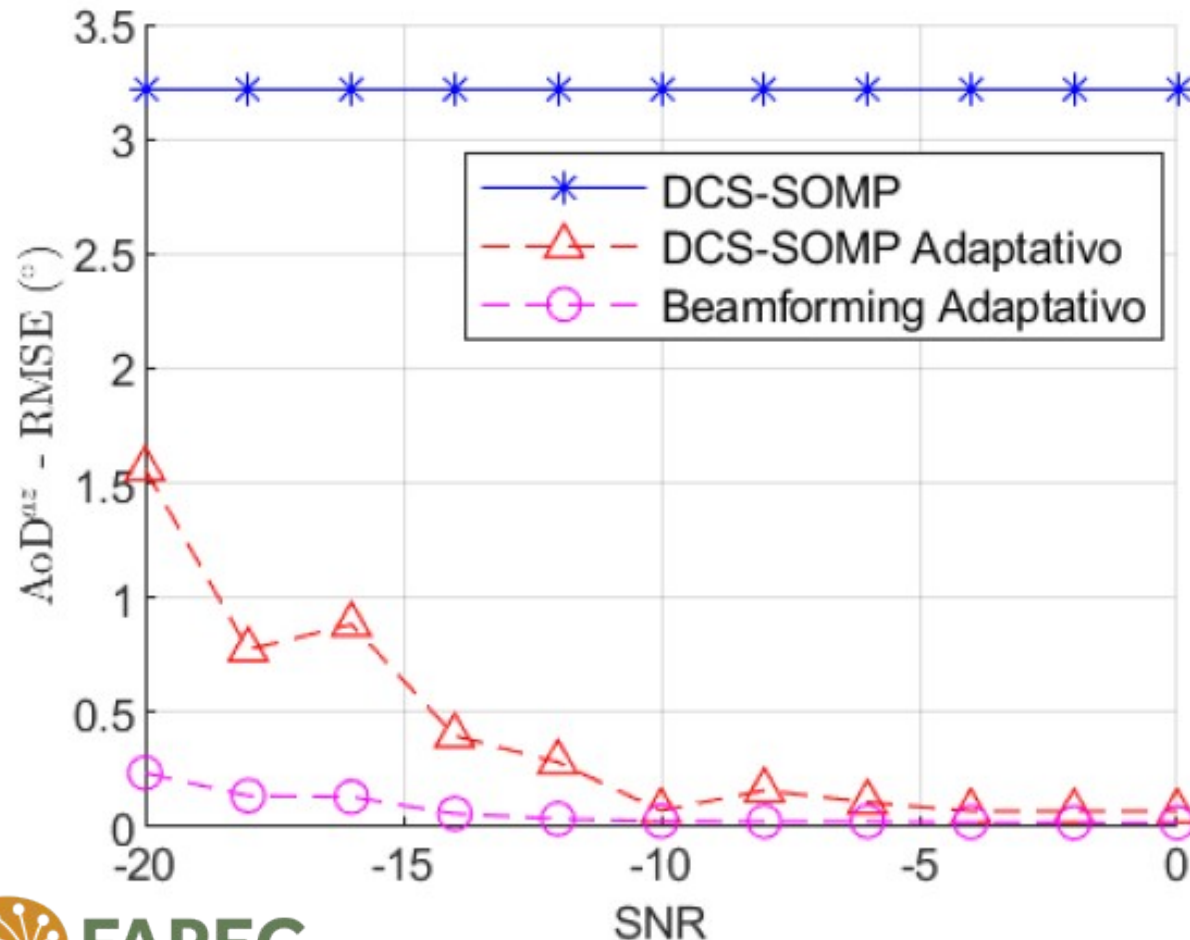
Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros



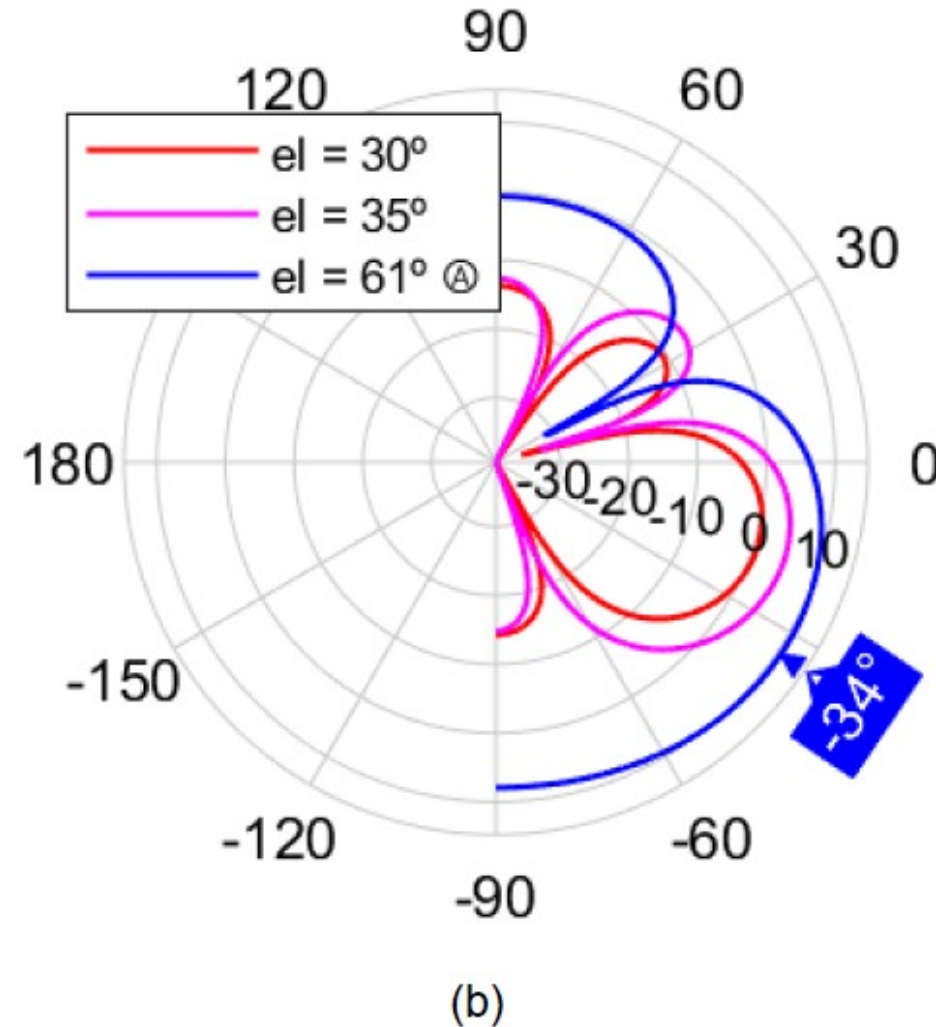
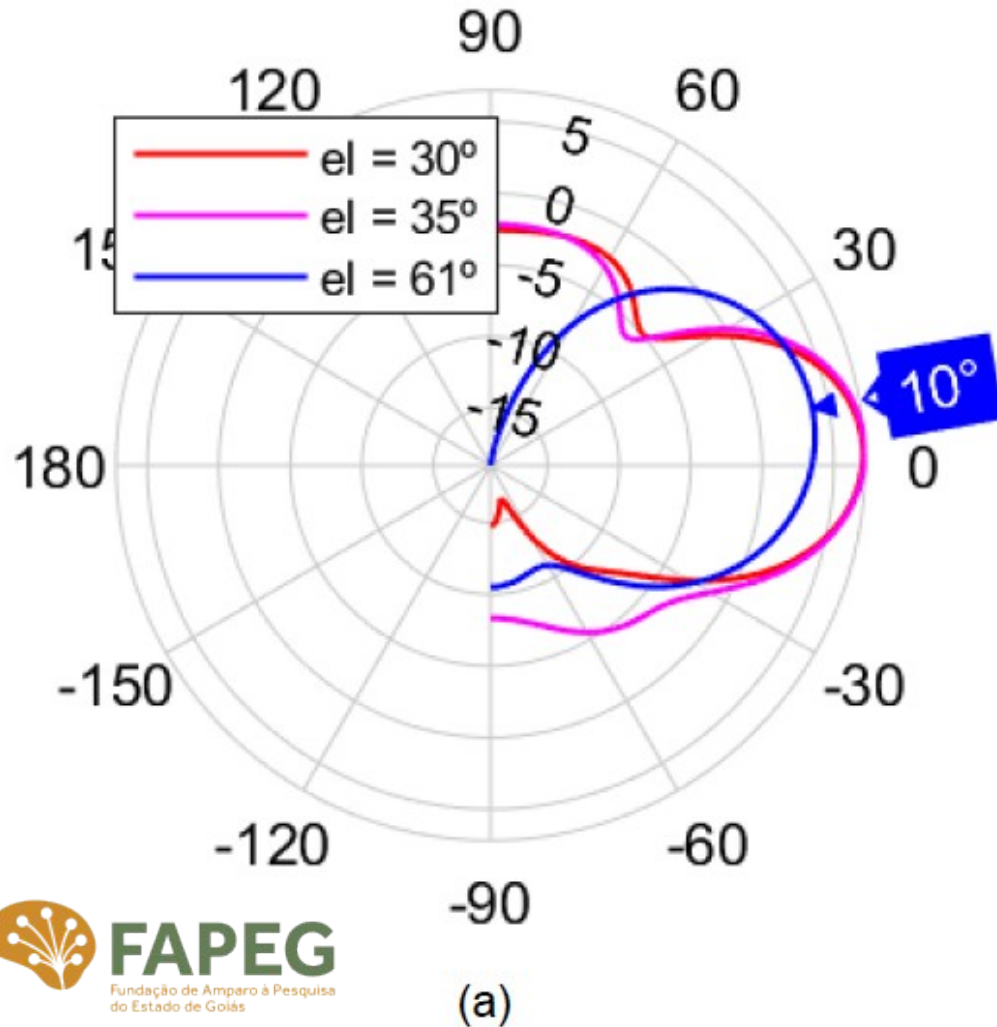
Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros – Beamforming Adaptativo



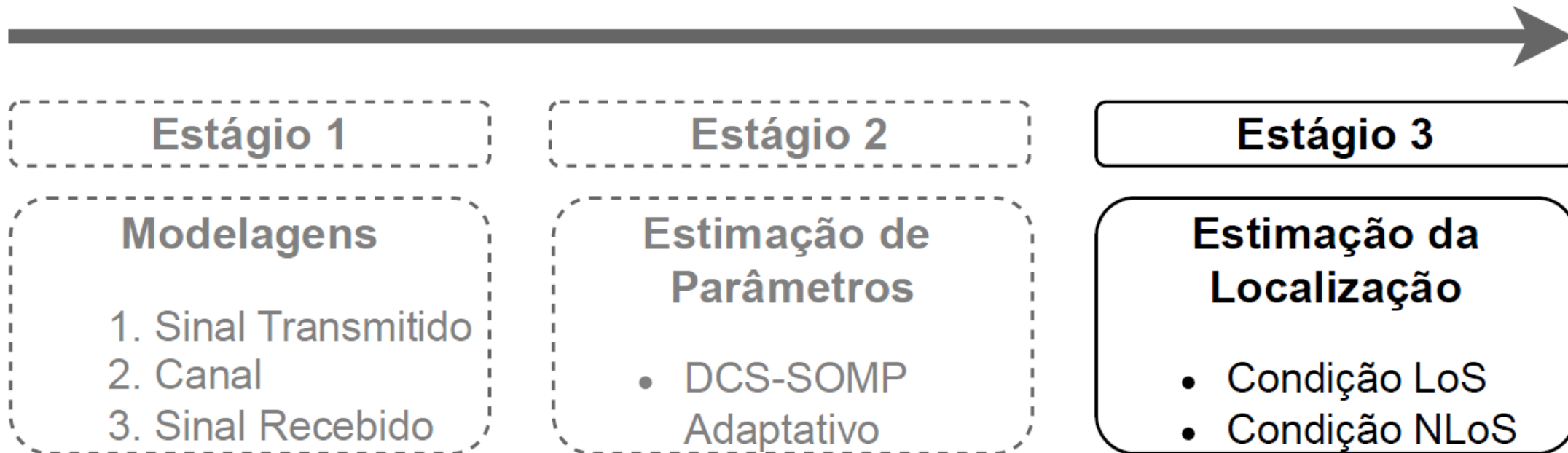
Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros – Beamforming Adaptativo



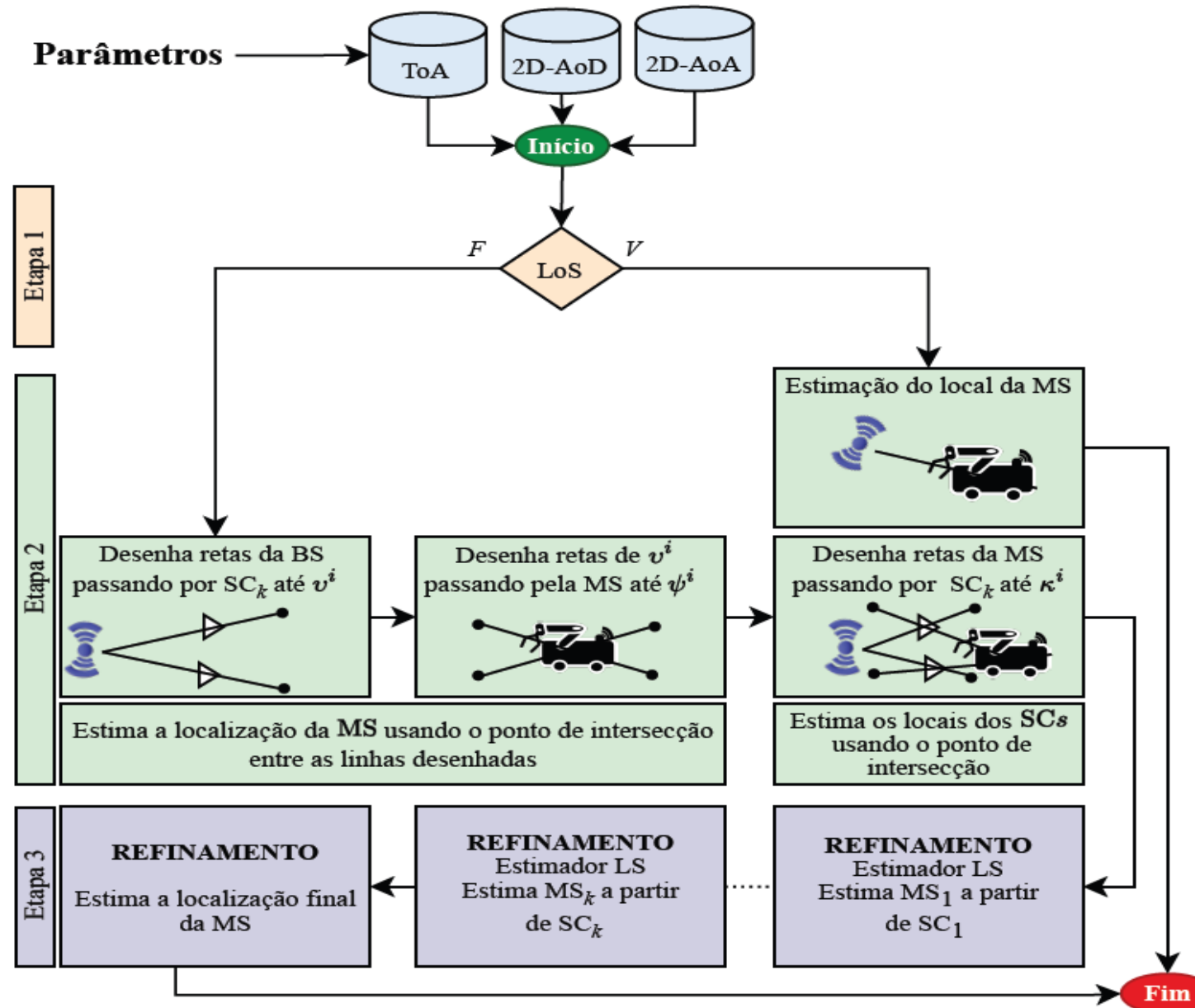
Localização em Rede 5G – Estimação de Parâmetros – Beamforming Adaptativo



Localização em Rede 5G

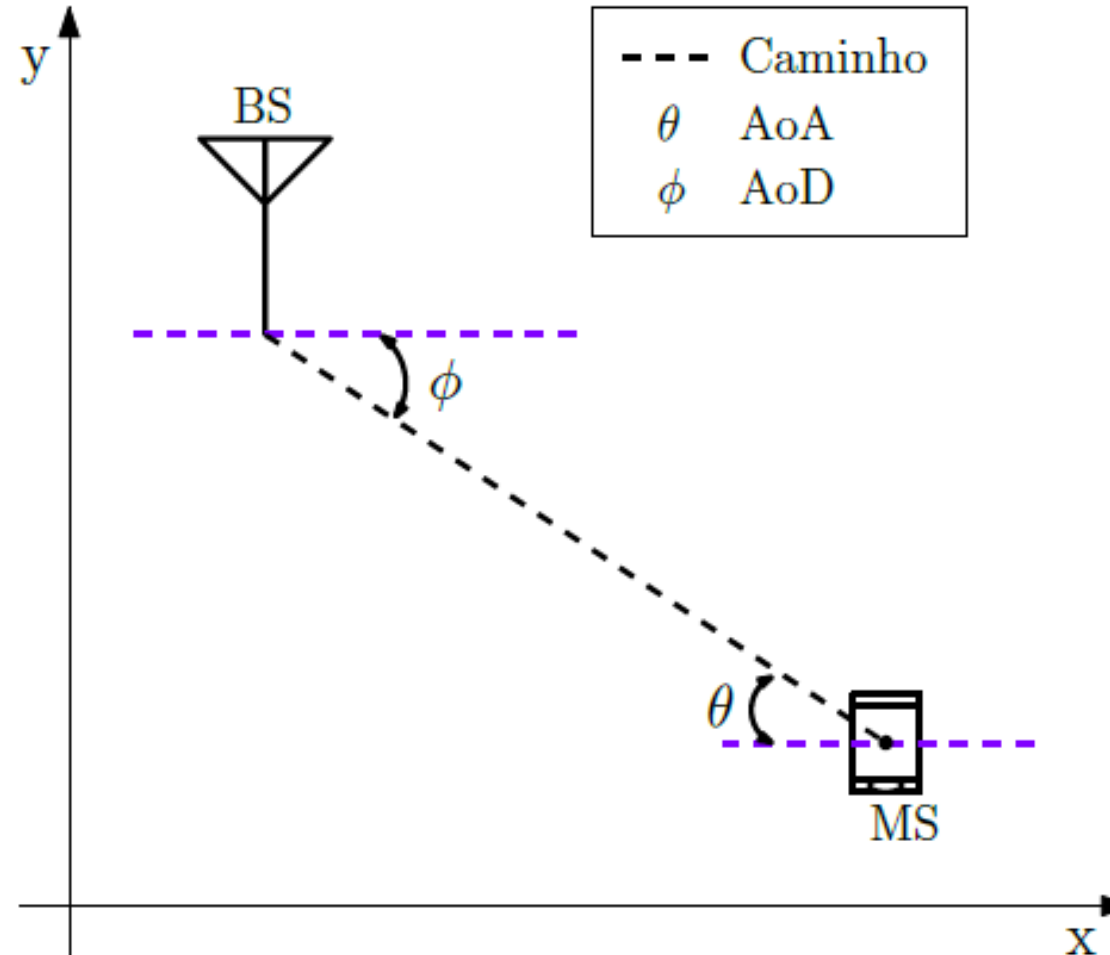


Localização em Rede 5G



Localização em Rede 5G

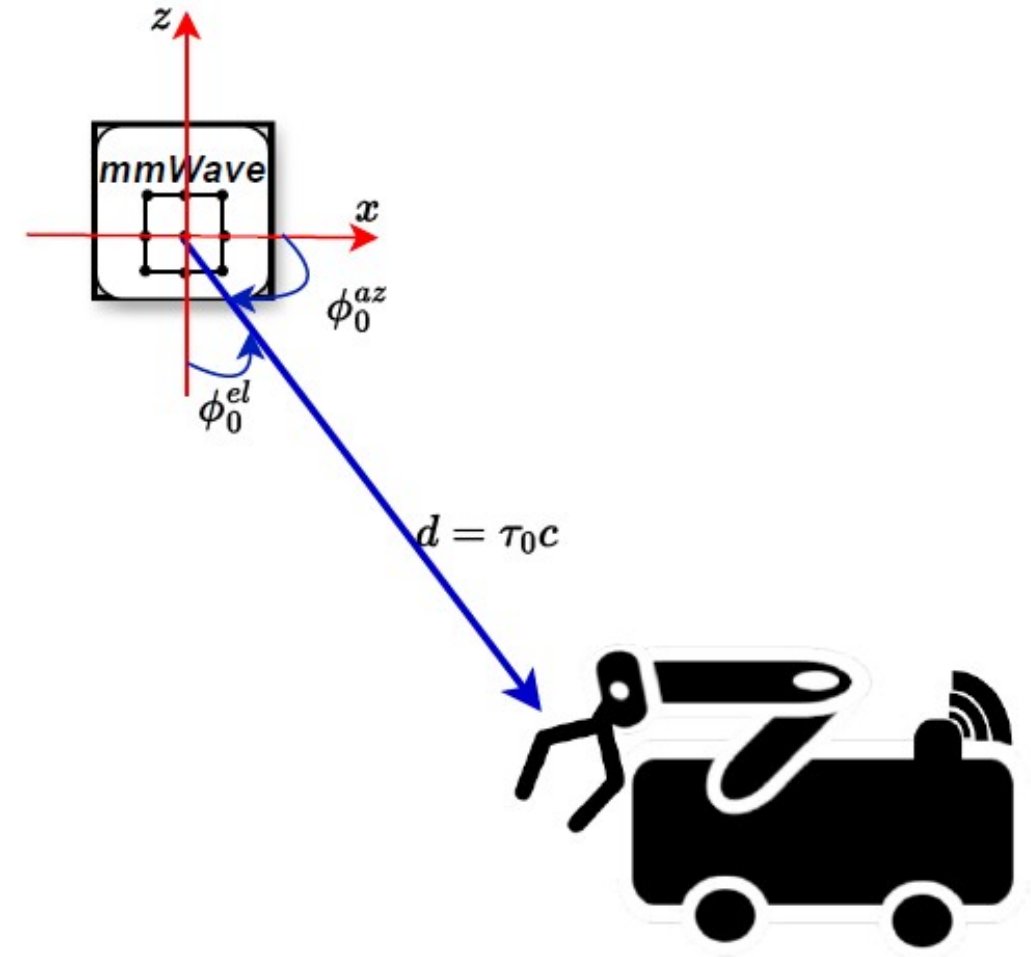
Etapa 1: detecção de LoS



Localização em Rede 5G

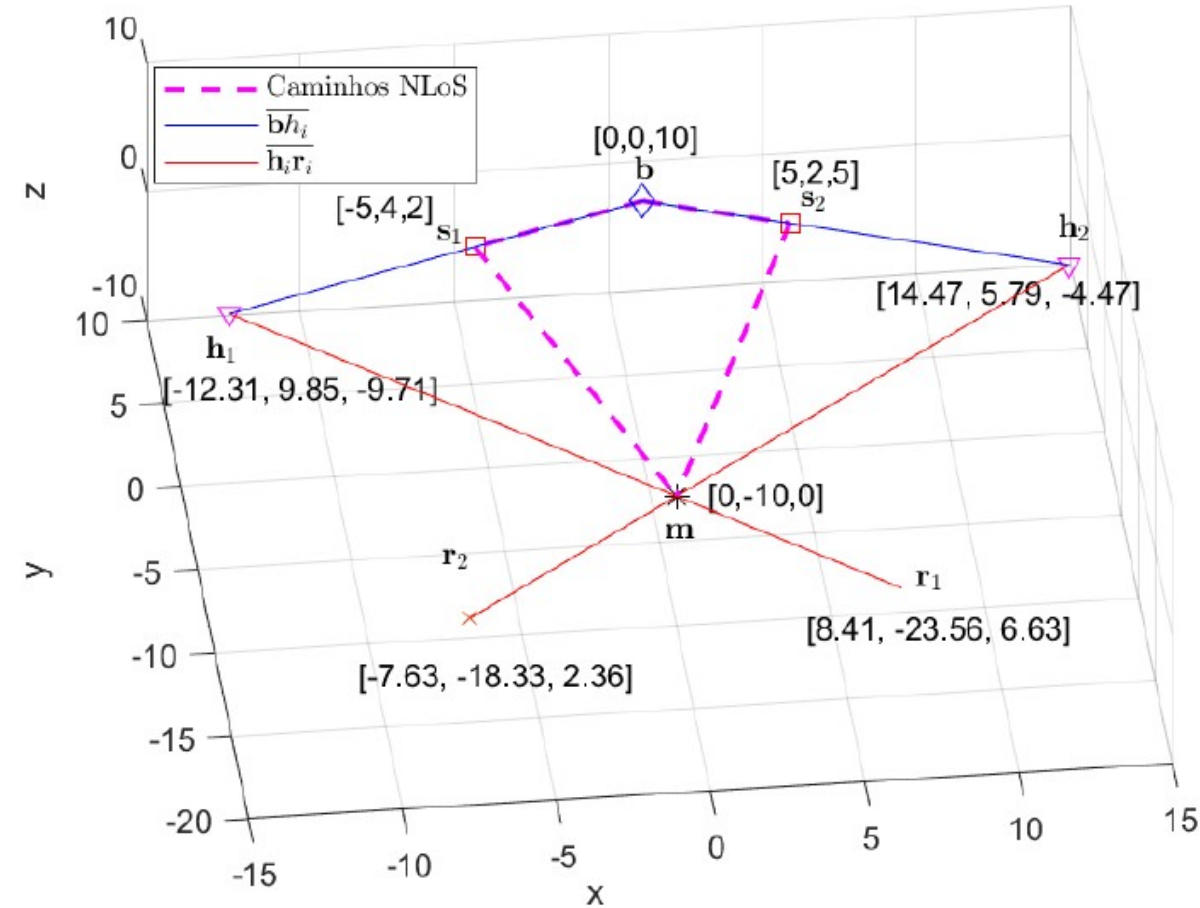
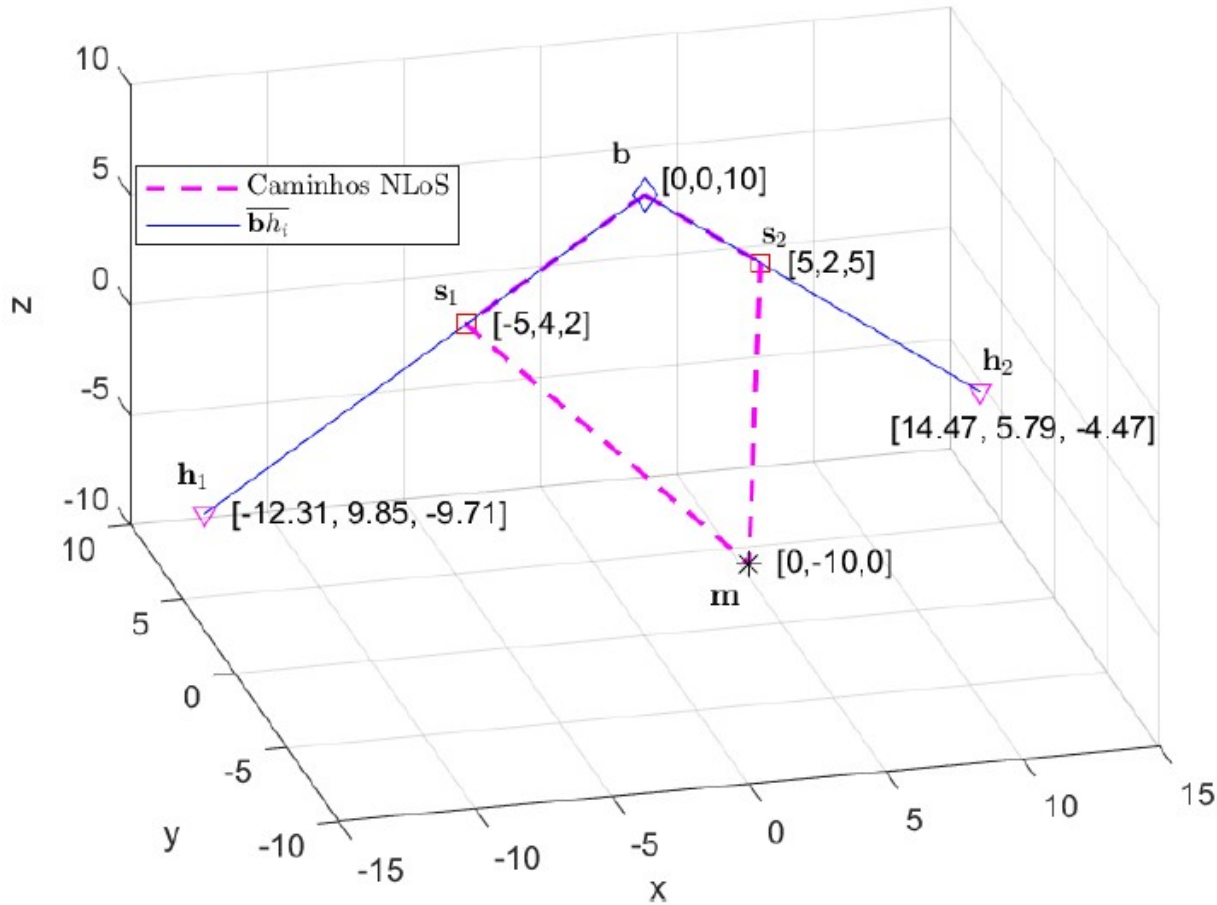
Etapa 2: Método LoS

$$\hat{\mathbf{m}} = \mathbf{b} + d \begin{bmatrix} \sin(\phi_0^{el}) \cos(\phi_0^{az}) \\ \sin(\phi_0^{el}) \sin(\phi_0^{az}) \\ \cos(\phi_0^{el}) \end{bmatrix}.$$



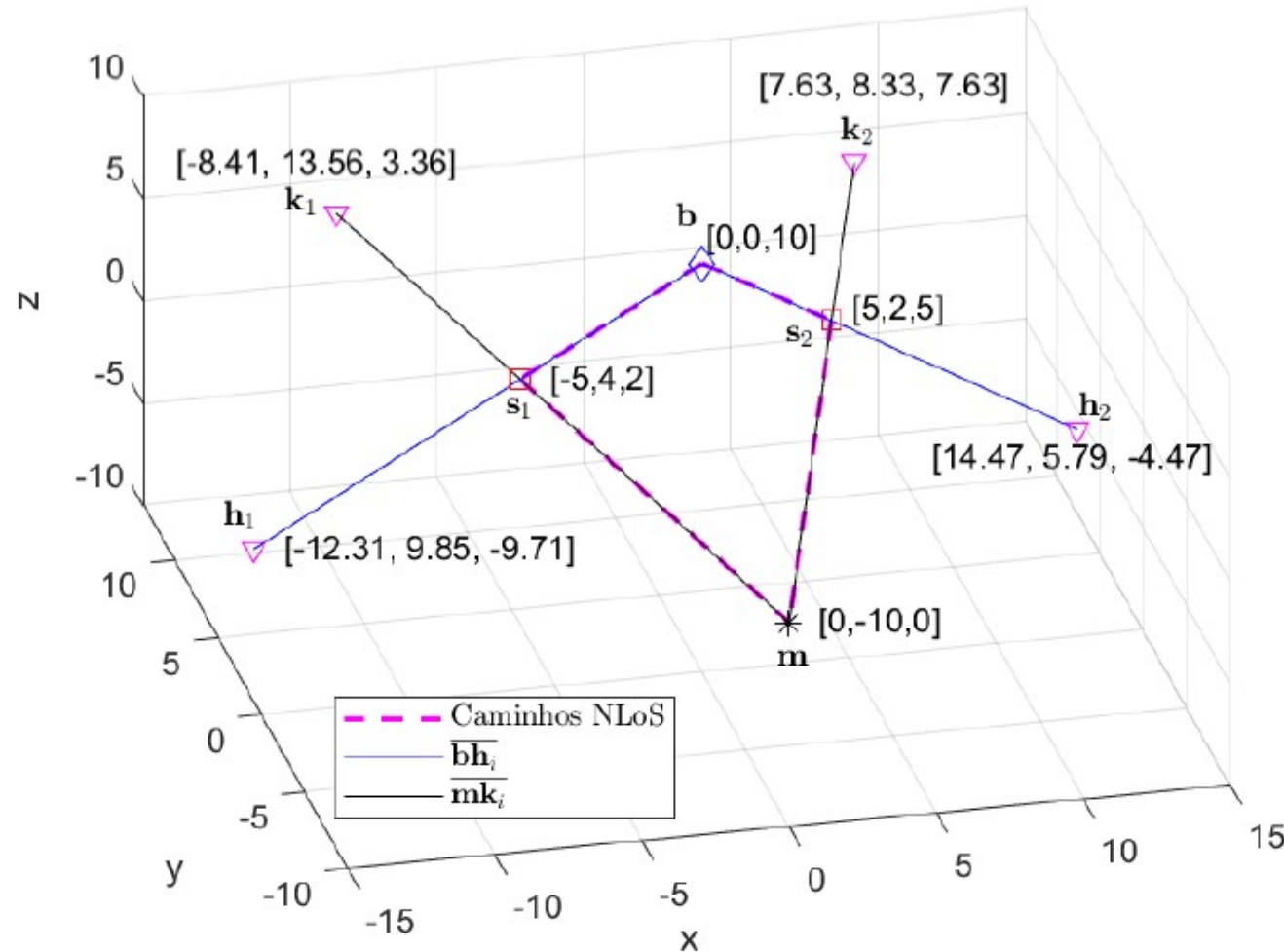
Localização em Rede 5G

Etapa 2: Método NLoS



Localização em Rede 5G

Etapa 2: Método NLoS



Localização em Rede 5G

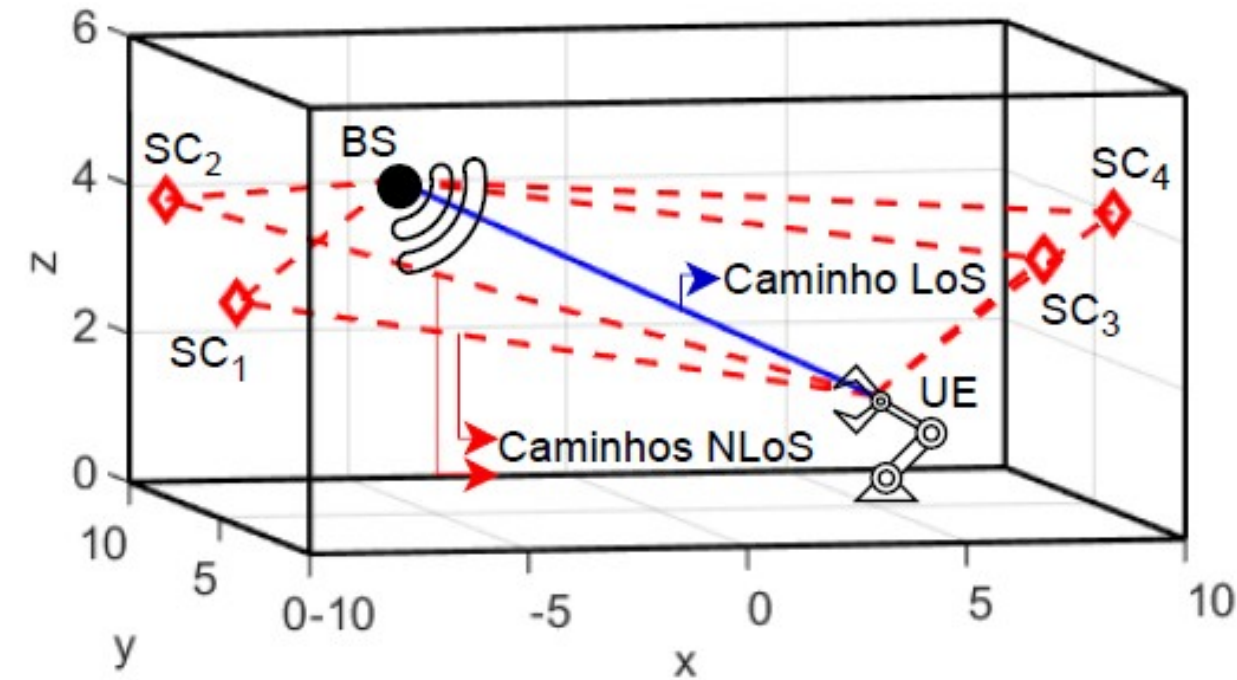
Etapa 3: Método NLoS

- Método de Gauss-Newton para cada SC

$$\mathbf{Q} = \left[\begin{array}{cccc} \varrho_{1,1} & \varrho_{1,2} & \dots & \varrho_{1,K} \\ \varrho_{2,1} & \varrho_{2,2} & \dots & \varrho_{2,K} \\ \varrho_{3,1} & \varrho_{3,2} & \dots & \varrho_{3,K} \\ \varrho_{4,1} & \varrho_{4,2} & \dots & \varrho_{4,K} \\ \varrho_{5,1} & \varrho_{5,2} & \dots & \varrho_{5,K} \\ \varrho_{6,1} & \varrho_{6,2} & \dots & \varrho_{6,K} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{Localização do UE} \\ \text{Localização dos SCs} \end{array} \right.$$

Localização em Rede 5G

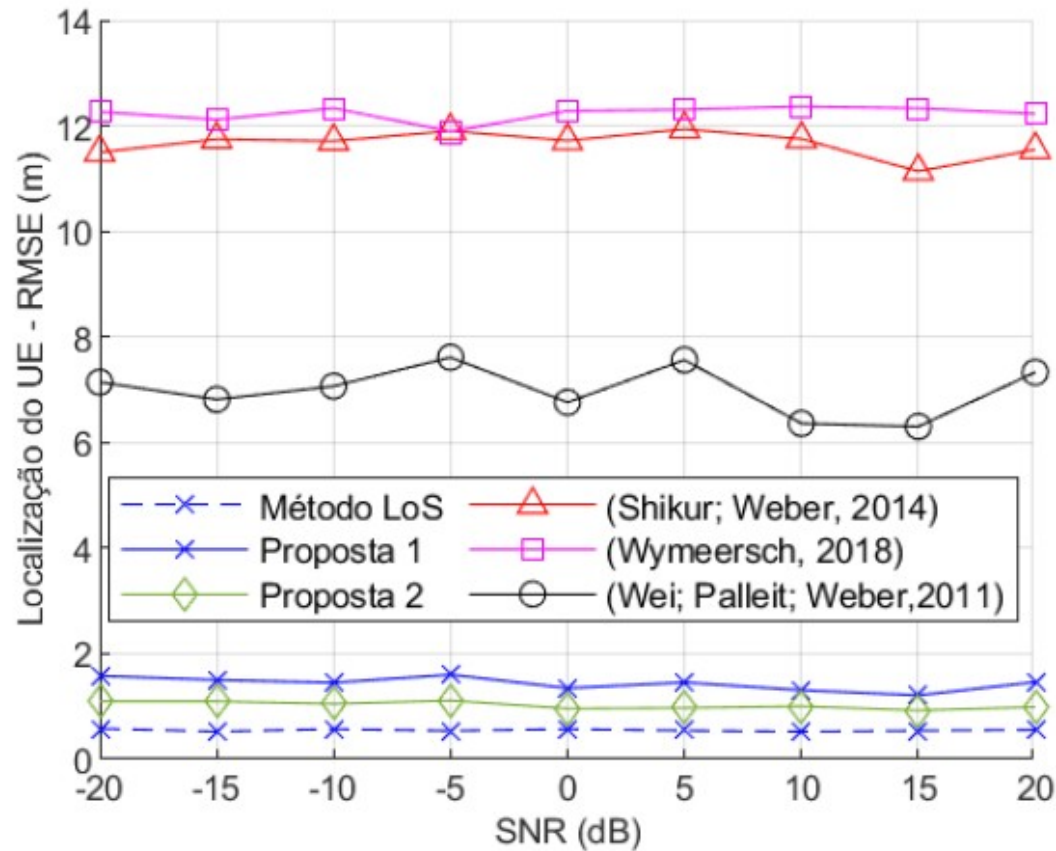
Resultados



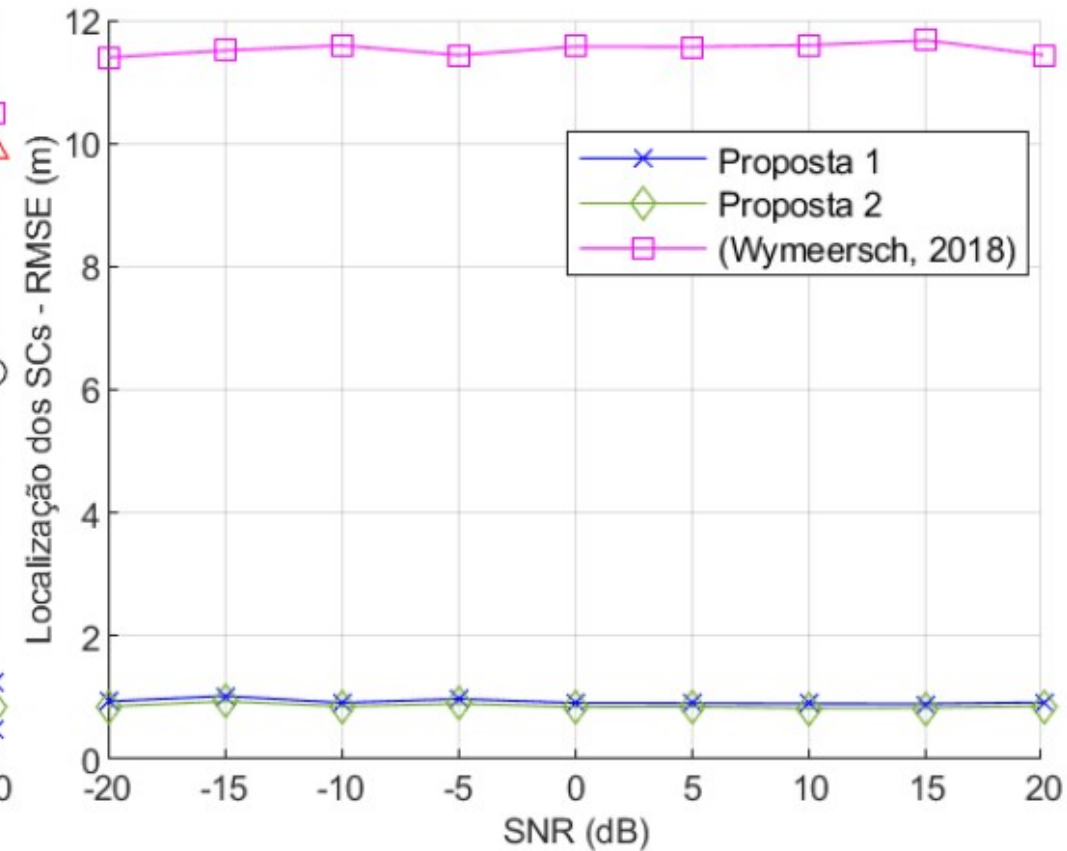
Ambiente	InO-SH
Tamanho (m)	$20 \times 10 \times 6$ ($C \times L \times A$)
Posição da BS	$\mathbf{b} = [-8, 0, 5]^T$
Posição do UE	$\mathbf{m} = [7, 10, 1]^T$
Posições dos SCs	$\mathbf{s}_1 = [-10, 4, 3]^T$
	$\mathbf{s}_2 = [-10, 8, 4]^T$
	$\mathbf{s}_3 = [10, 8, 3]^T$
	$\mathbf{s}_4 = [10, 4, 4]^T$

Localização em Rede 5G

Resultados



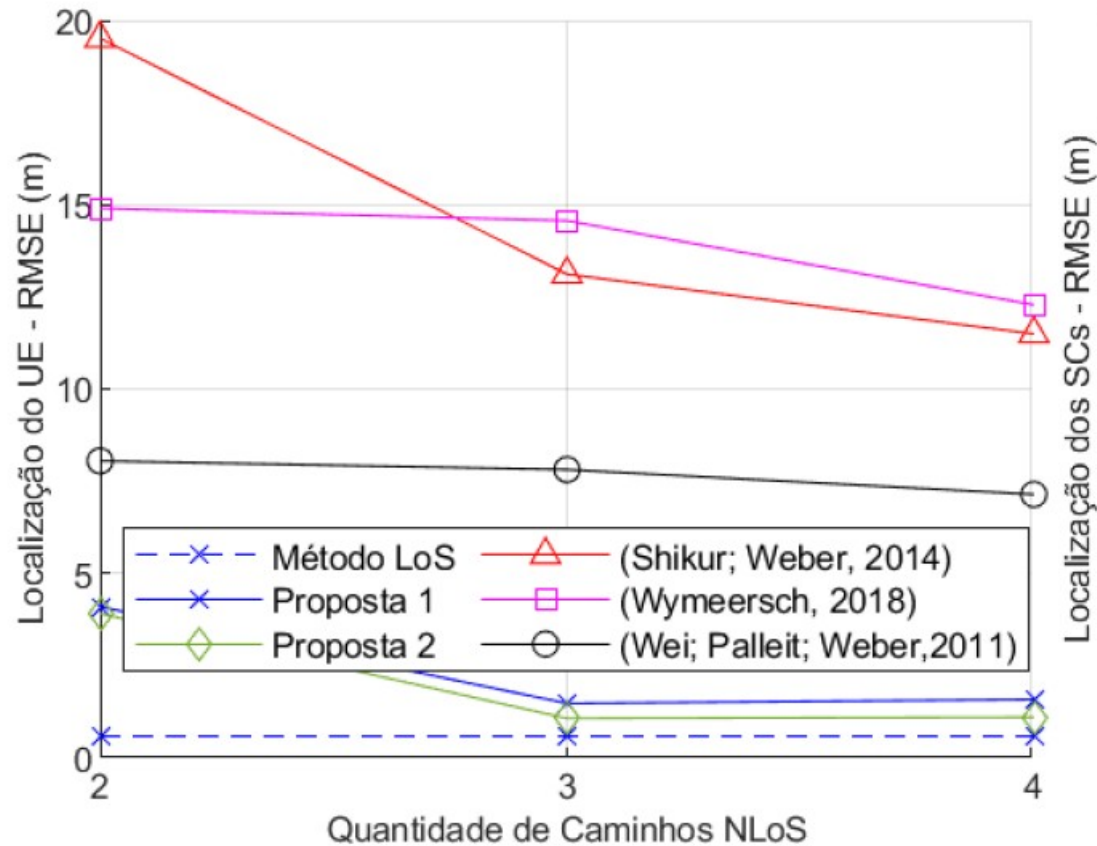
(a)



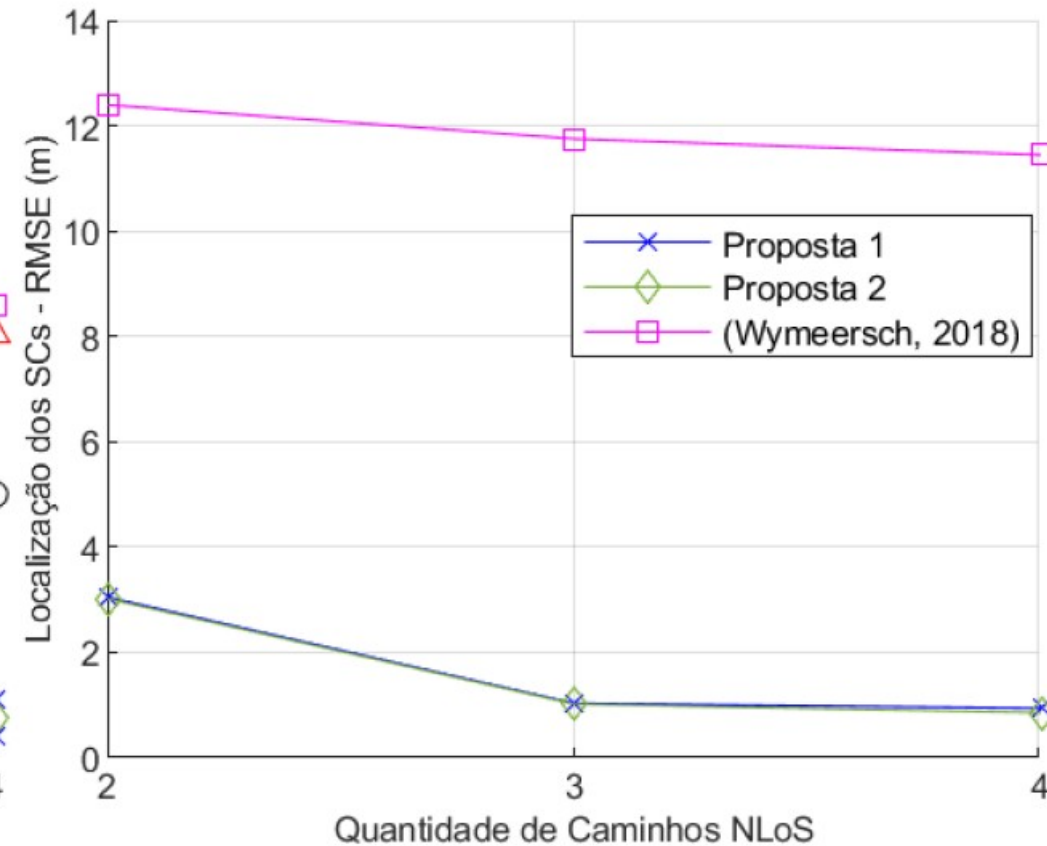
(b)

Localização em Rede 5G

Resultados



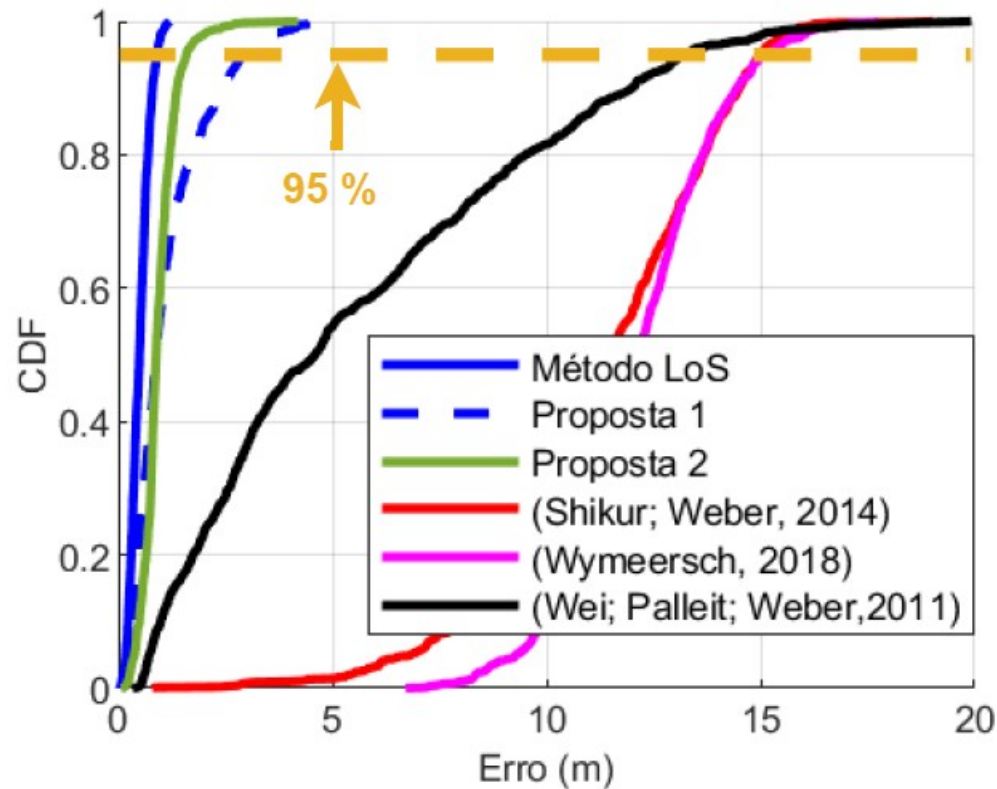
(a)



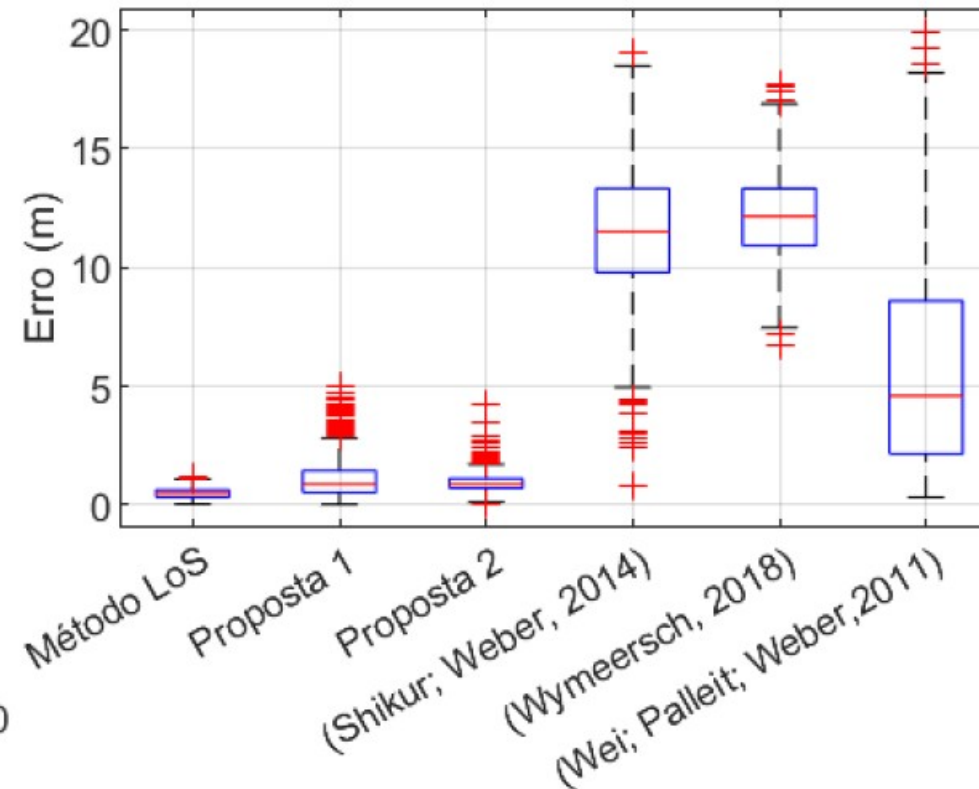
(b)

Localização em Rede 5G

Resultados



(a)



(b)

Localização em Rede 5G

Resultados

Método	RMSE (m)	Acurácia – 95% (m)	Tempo de execução (s)
Método LoS	0,54	0,91	0,10
Proposta 1	1,15	2,95	0,19
Proposta 2	0,95	1,58	0,94
Shikur e Weber (2014)	12,14	14,96	0,50
Wymeersch (2018)	14,37	15,10	8,97
Wei, Palleit e Weber (2011)	5,63	13,17	0,22

Localização em Rede 5G

Resultados

Tabela 5.2 – Requerimentos de acurácia para ambientes internos estabelecidos pela 3GPP.

Nível de Serviço	Acurácia Horizontal 95% (m)	Acurácia Vertical 95% (m)
1	10	3
2	3	3
3	1	2
4	1	2
5	0,3	2
6	0,3	2
7	0,2	0,2

Fonte: Dados obtidos de 3GPP (2023)

Localização em Rede 5G

Resultados

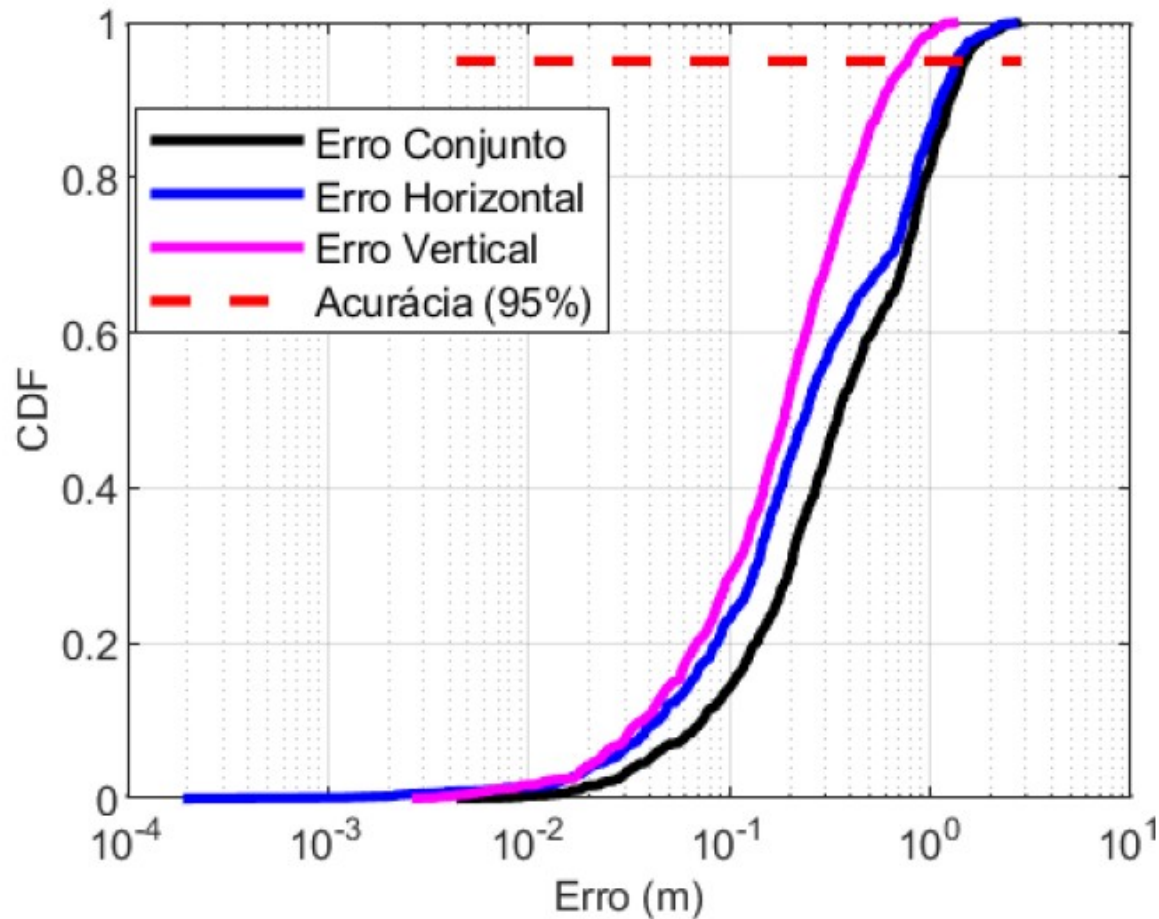


Tabela 5.3 – Dados finais do *IndoorLoc*.

Métrica	Valor Obtido
RMSE (m)	0,7384
Acurácia Total para 95% (m)	1,4855
Acurácia Horizontal para 95% (m)	1,3588
Acurácia Vertical para 95% (m)	0,7702

Publicações



- Submetido
 - CONCEIÇÃO, P. F.; LEMOS, R. P.; ROCHA, F. G. C. **A Joint Channel Modeling, Parameter Estimation, and Geometry-Based Indoor Localization for 5G Systems.** Em: Transactions on Emerging Telecommunications Technologies (ETT) – Wiley.

Atividade Práticas no Cerise

1) Extração de CSI usando as placas disponíveis

- Extração de CSI usando as placas WiFi

2) Localização e detecção de pose usando CSI

- Testes com métodos de aprendizagem de máquina com *dataSets* prontos e com extrações reais
- Desenvolvimento de algoritmo próprio

Conclusões

- Importância da Localização
- O processo de localização deve:
 - Modelagem do canal e sinal recebido
 - Estimação dos Parâmetros de Localização
 - Localizar a MS
- Os métodos propostos atendem as especificações da FCC e 3GPP
- Pesquisas futuras:
 - Estudo de *Beamforming* e Arranjo de Antenas
 - Experimento em ambiente real usando USRP
 - *Reconfigurable Intelligent Surfaces* (RIS)

Localização em Ambiente Indoor Usando a Rede Celular

Grupo/Eixo Temático: 5G-OPEN RAN

Participante: Paulo Francisco da Conceição
(pfrancisco43@gmail.com)

Obrigado!