

Análise de sistemas de geolocalização baseados em GPS e AoA para foguetes de sondagem atmosférica

Heitor Rodrigues Savegnago

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
UFABC

2025



Introdução

Contextualização

Objetivos

GNSS

Emissão de sinais

Onda plana

AoA

Malha de antenas

Calculo de fase

Simulação

Resultados

Três antenas

Cinco antenas

Setes antenas

Finalização

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização

Foguetes de sondagem

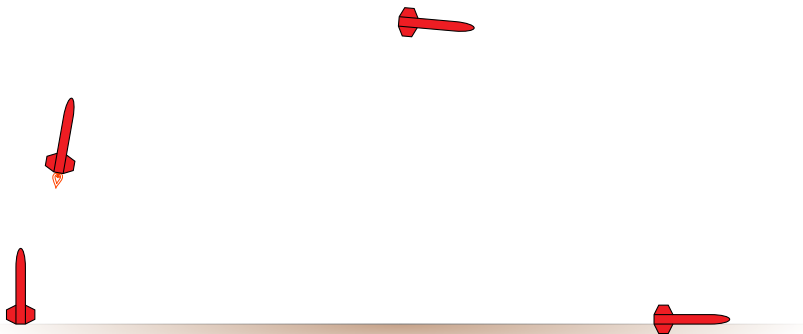
- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- ▶ Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- ▶ Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet
- ▶ Mas mesmo nesses casos, é possível haver o sinal da telemetria de bordo

Foguetes de sondagem

- ▶ Foguete de lançamento terrestre sub-orbital
- ▶ A Sequência de operação consiste em lançamento, abertura de paraquedas, pouso e localização
- ▶ Em alguns casos, o lançamento é realizado onde não há sinal de internet
- ▶ Mas mesmo nesses casos, é possível haver o sinal da telemetria de bordo



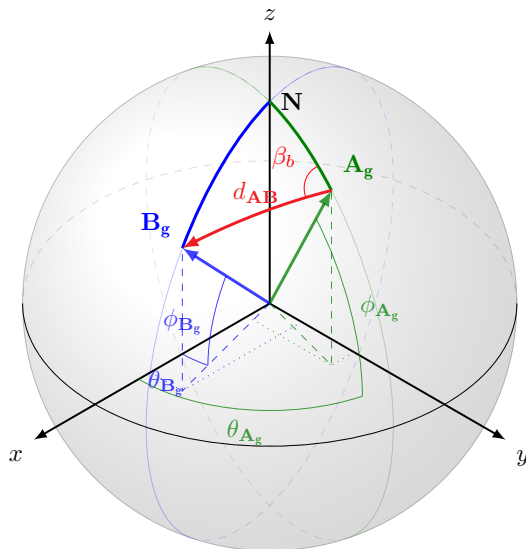
Objetivos

- Utilizar métodos de AoA para determinar direção de origem do sinal

Objetivos

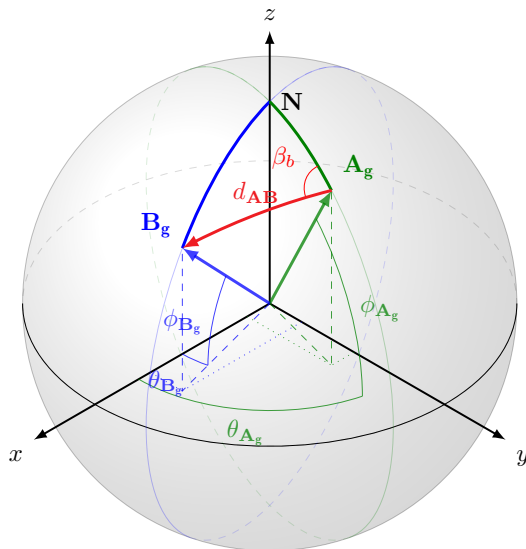
- ▶ Utilizar métodos de AoA para determinar direção de origem do sinal
- ▶ Comparar a performance com um sistema semelhante baseado em GPS

Coordenadas Geográficas



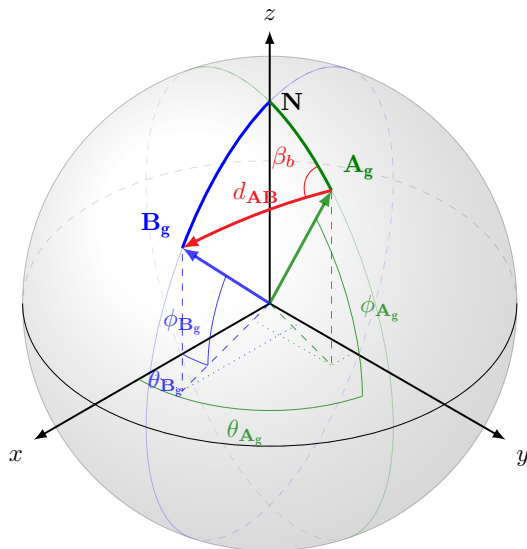
- A e B são coordenadas geográficas

Coordenadas Geográficas



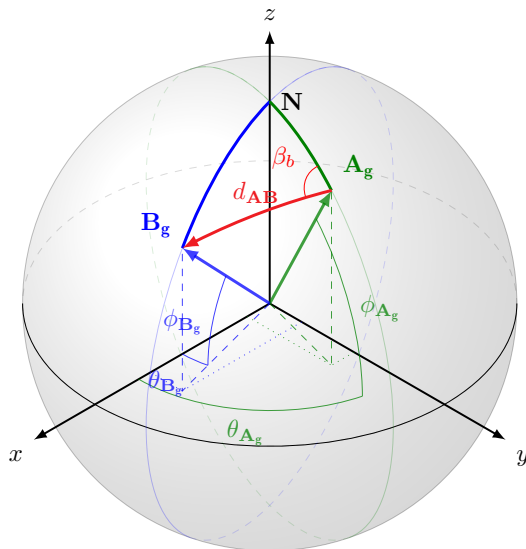
- ▶ A e B são coordenadas geográficas
- ▶ θ_A e θ_B são latitudes

Coordenadas Geográficas



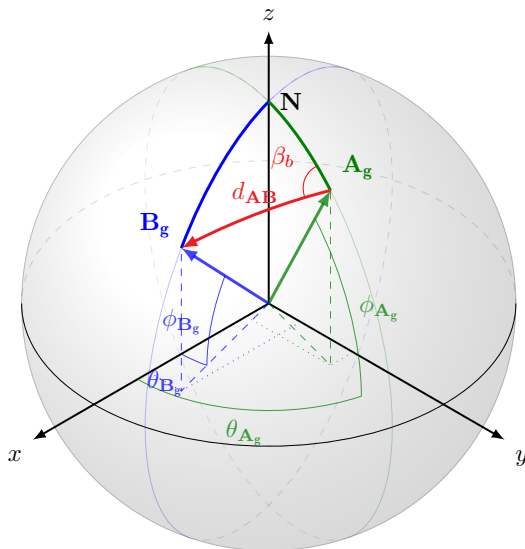
- ▶ A e B são coordenadas geográficas
- ▶ θ_A e θ_B são latitudes
- ▶ ϕ_A e ϕ_B são longitudes

Coordenadas Geográficas



- ▶ A e B são coordenadas geográficas
- ▶ θ_A e θ_B são latitudes
- ▶ ϕ_A e ϕ_B são longitudes
- ▶ Conhecendo essas informações, é possível determinar o ângulo β relativo entre as duas coordenadas

Coordenadas Geográficas



- ▶ A e B são coordenadas geográficas
- ▶ θ_A e θ_B são latitudes
- ▶ ϕ_A e ϕ_B são longitudes
- ▶ Conhecendo essas informações, é possível determinar o ângulo β relativo entre as duas coordenadas
- ▶ Também é possível determinar sua distância

Cálculo de Bearing

$$\Delta\phi = \phi_B - \phi_A$$

$$\Delta\theta = \theta_B - \theta_A$$

$$X = \cos(\theta_B) \cdot \sin(\Delta\phi)$$

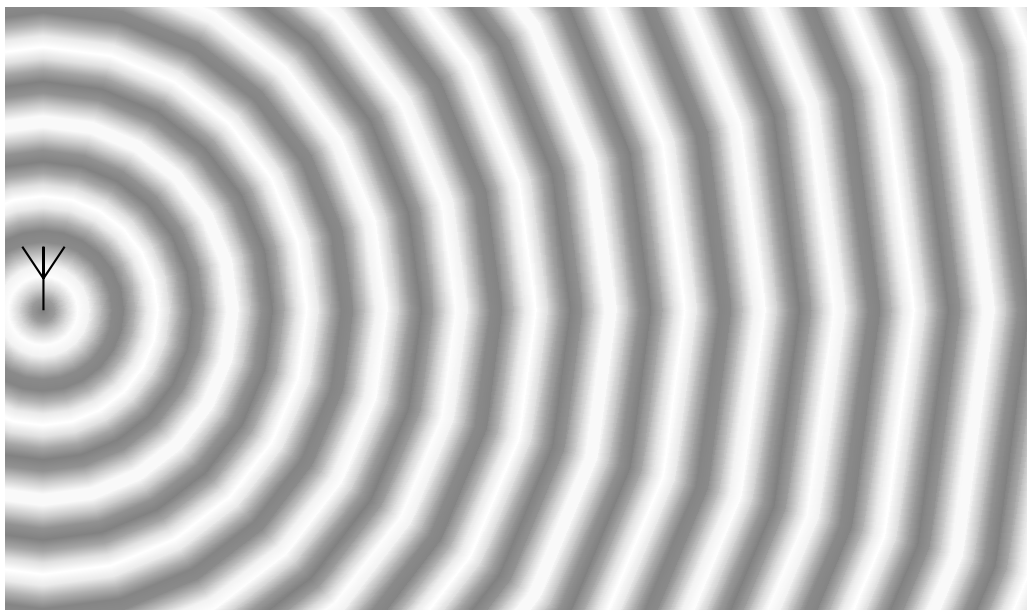
$$Y = \cos(\theta_A) \cdot \sin(\theta_B) - \sin(\theta_A) \cdot \cos(\theta_B) \cdot \cos(\Delta\phi)$$

$$Z = \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) + \cos(\theta_B) \cdot \cos(\theta_A) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right)$$

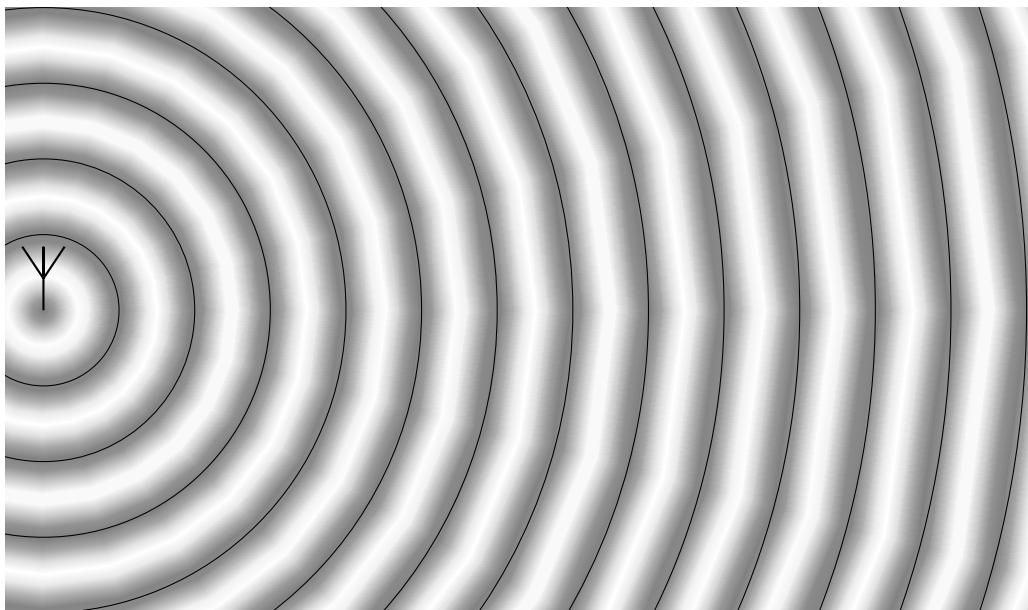
$$\beta_b = \arctan\left(\frac{X}{Y}\right)$$

$$d_{AB} = R_{\text{Terra}} \cdot 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{Z}}{\sqrt{1-Z}}\right)$$

Emissão de sinal radial



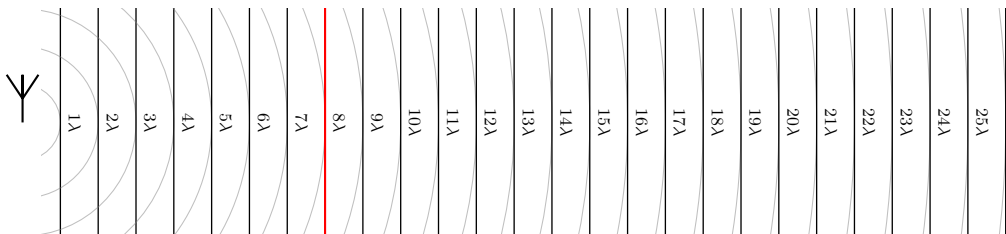
Frentes de onda



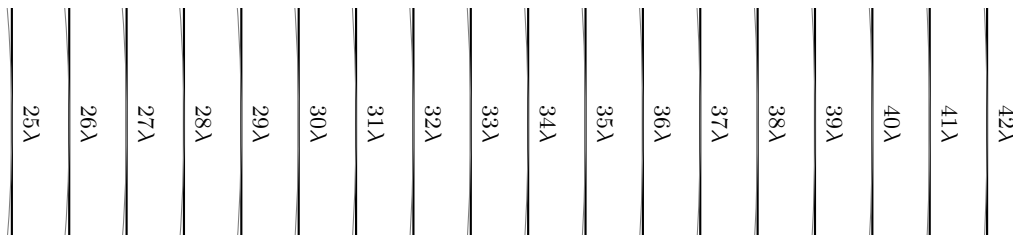
Representação de frentes de onda



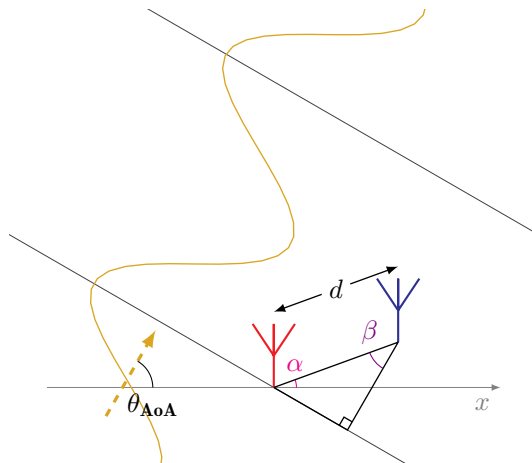
Comportamento da onda no espaço próximo



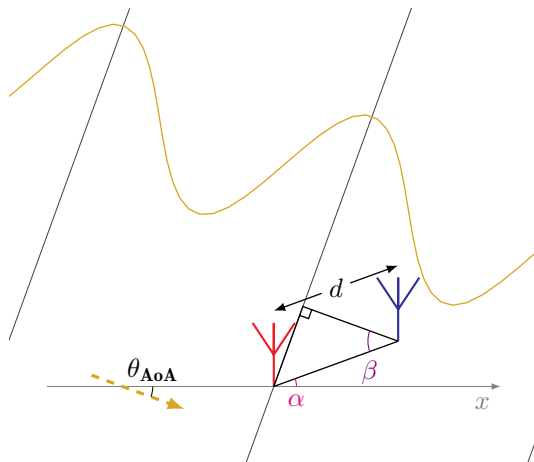
Comportamento da onda em espaço distante (*far field*)



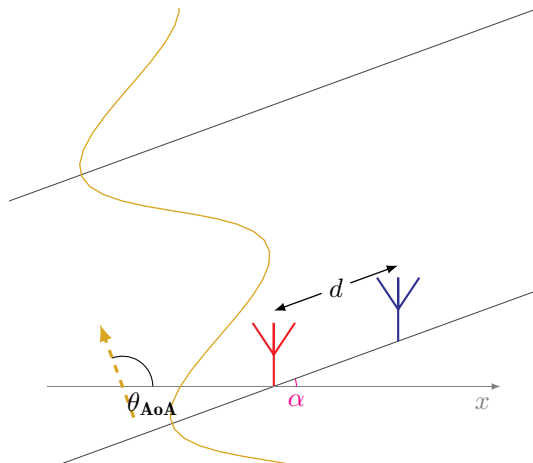
Angle of Arrival



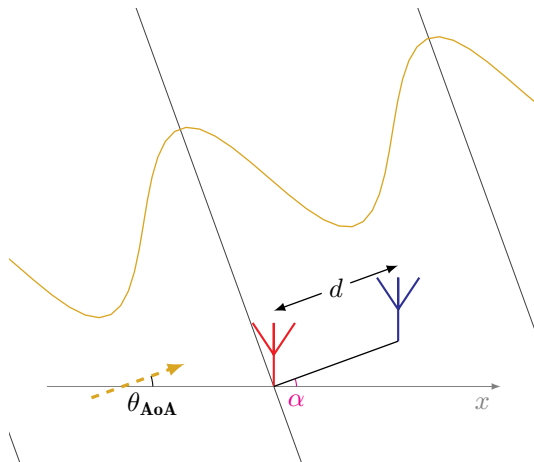
Angle of Arrival



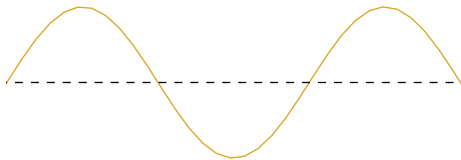
Angle of Arrival



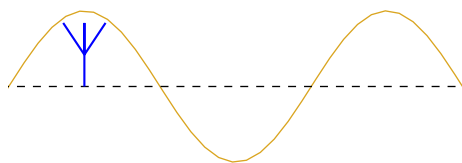
Angle of Arrival



Distância d

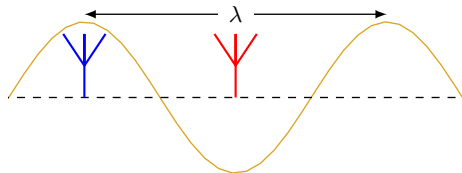


Distância d



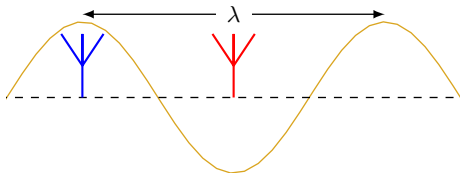
► Toma-se uma **antena** como referência

Distância d



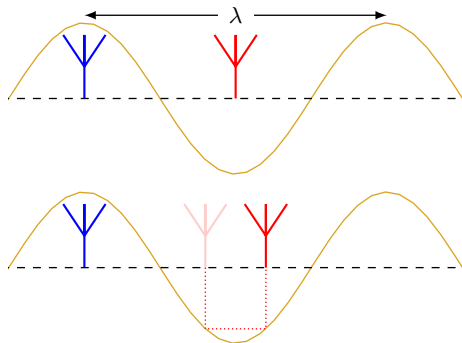
- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada

Distância d



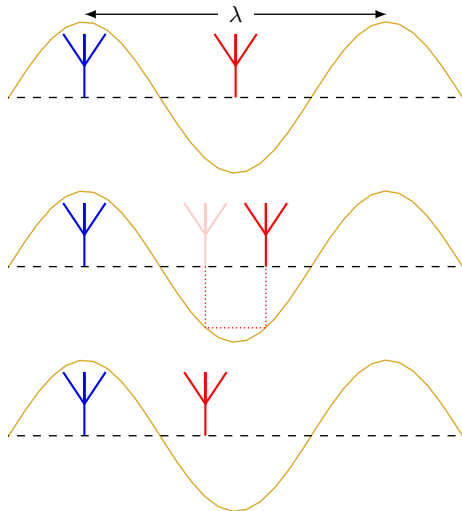
- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal

Distância d



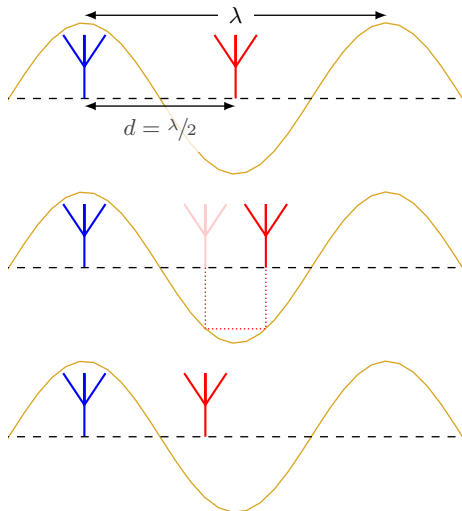
- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem

Distância d



- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem
- Se for menor, há perda de resolução

Distância d



- Toma-se uma **antena** como referência
- Posiciona-se uma segunda **antena** a uma distância determinada
- Analisando a defasagem entre as antenas, é possível determinar o ângulo de incidência do sinal
- Se a distância for maior que $\lambda/2$, haverá conflito de defasagem
- Se for menor, há perda de resolução
- Adota-se a distância de $d = \lambda/2$

Geometria da malha de antenas

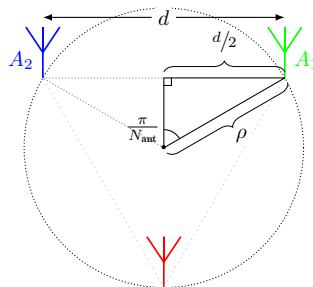
$$\rho = \frac{d}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{ant}}}\right)}$$

$$k = \{1, 2, \dots, N_{\text{ant}}\}$$

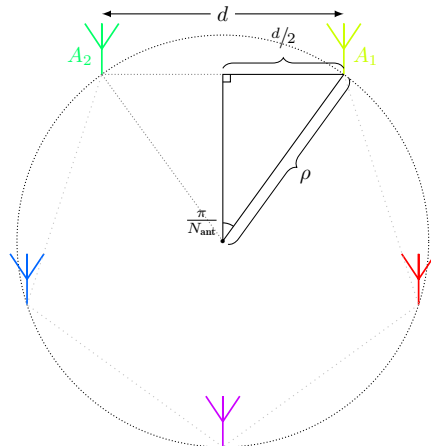
$$A_k = \rho \cdot \exp\left(i \cdot k \cdot \frac{2\pi}{N_{\text{ant}}}\right) = (\mathcal{R}e(A_k), \mathcal{I}m(A_k)) = (x_{A_k}, y_{A_k})$$

$$\alpha_k = \arg(A_k - A_{k+1})$$

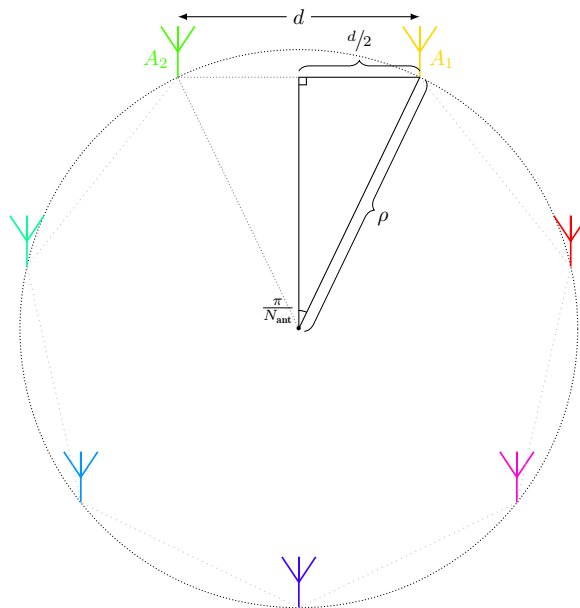
Três antenas



Cinco antenas



Sete antenas



Geometria do sistema

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$$

$$I_k = \int_0^T \cos(\omega \cdot \tau) \cdot w(x_{A_k}, y_{A_k}, \tau) \partial \tau$$

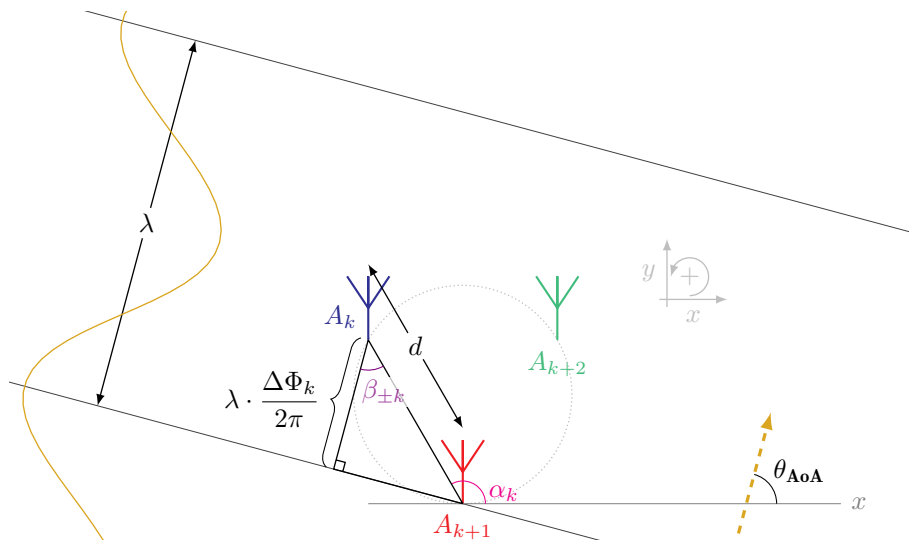
$$Q_k = \int_0^T \sin(\omega \cdot \tau) \cdot w(x_{A_k}, y_{A_k}, \tau) \partial \tau$$

$$Z_k = \frac{\omega}{\pi} \cdot (I_k + iQ_k)$$

$$\Delta_\Phi = \Phi_k - \Phi_{k+1} = \arg(Z_k) - \arg(Z_{k+1}) = \arg(Z_k \cdot \overline{Z_{k+1}})$$

$$\beta_{\pm k} = \arccos\left(\frac{\lambda}{d} \cdot \frac{\Delta_\Phi}{2\pi}\right)$$

Geometria do sistema



Determinar AoA

$$\theta_{\pm k} = \alpha_k \pm \beta_{\pm k}$$

$$\Theta = \{\theta_{\pm k} \mid \forall k\}$$

$$\delta = \frac{\pi}{2 \cdot (1 + N_{\text{ant}})}$$

$$\Theta_{\lfloor \cdot \rfloor} = \left\{ \left\lfloor \frac{\theta}{\delta} \right\rfloor \cdot \delta \mid \forall \theta \in \Theta \right\}$$

$$\theta_{\mathcal{M}_o} = \mathcal{M}_o(\Theta_{\lfloor \cdot \rfloor})$$

$$\Theta_F = \{\theta \in \Theta \mid \theta_{\mathcal{M}_o} - \delta \leq \theta \leq \theta_{\mathcal{M}_o} + \delta\}$$

$$\theta_{\text{AoA}} = \widetilde{\Theta_F}$$

Definição de onda

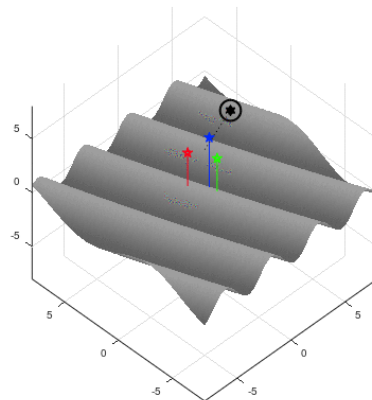
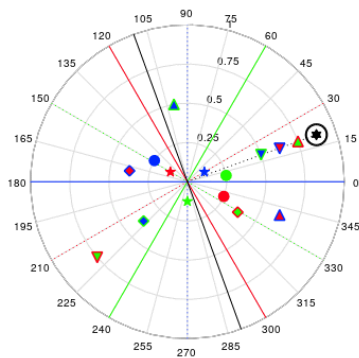
$$r_0 = r \cdot \lambda$$

$$x_0 = r_0 \cdot \cos(\theta)$$

$$y_0 = r_0 \cdot \sin(\theta)$$

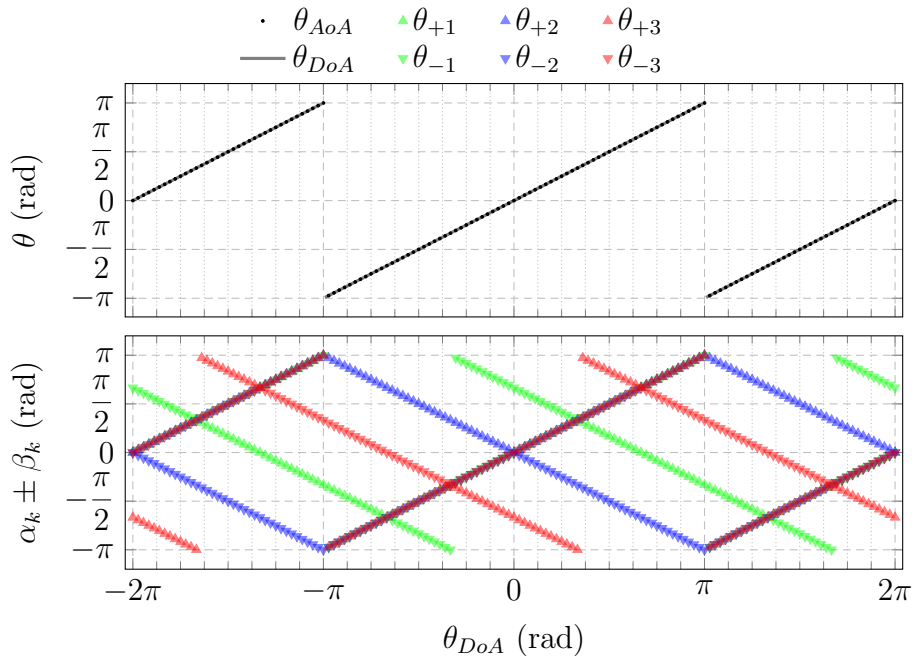
$$aux_{\text{argument_r}}(x, y, t, \theta, r, \phi, \lambda, \omega) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2} + \omega \cdot t + \phi$$

$$w(x, y, t, \theta, r, \phi, \lambda, \omega) = \frac{\sin(aux) + \cos(aux)}{\sqrt{2}}$$

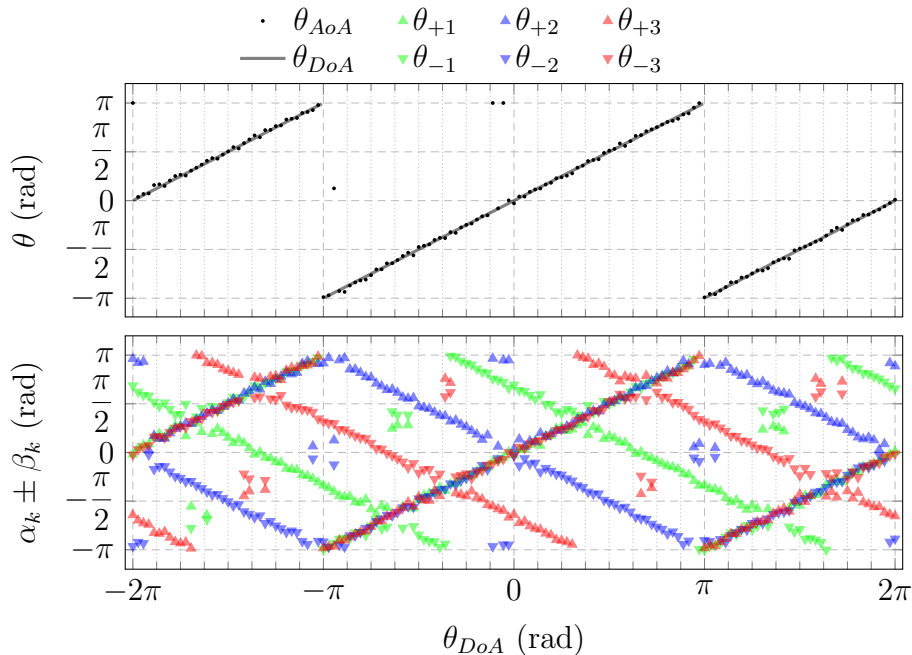


R^2 para três antenas

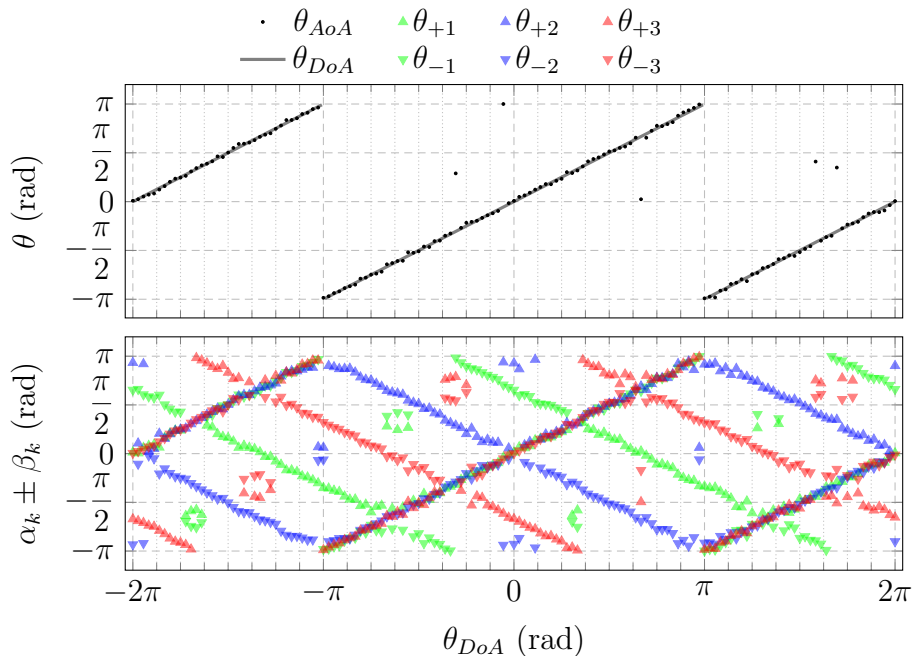
SNR (dB)	R^2 sem ATT (%)	R^2 com ATT (%)
∞	100,00	100,00
20	88,06	90,45
17	88,18	87,98
14	99,99	84,49
7	90,12	83,50
0	76,32	78,73



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).



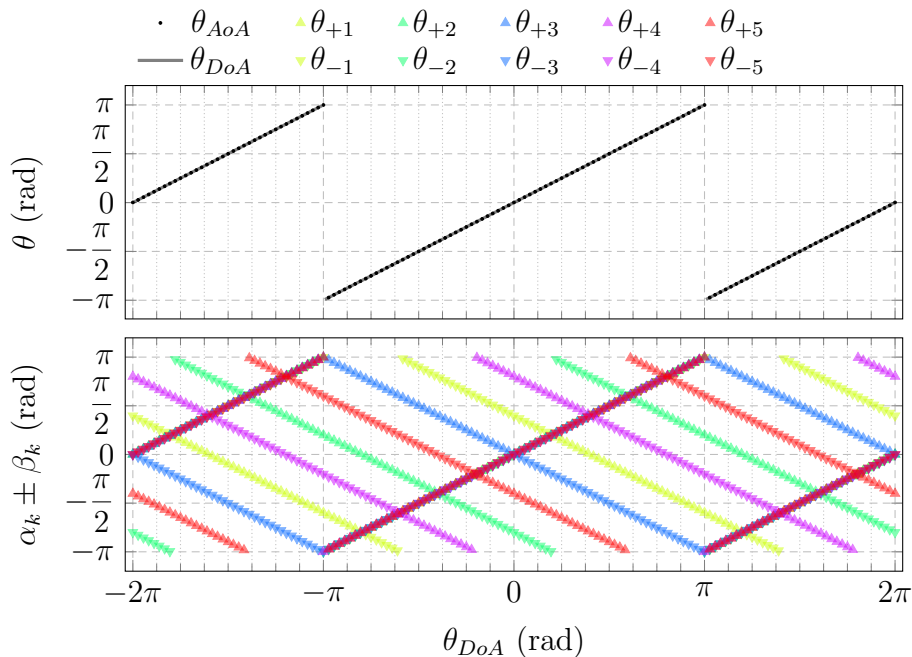
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).



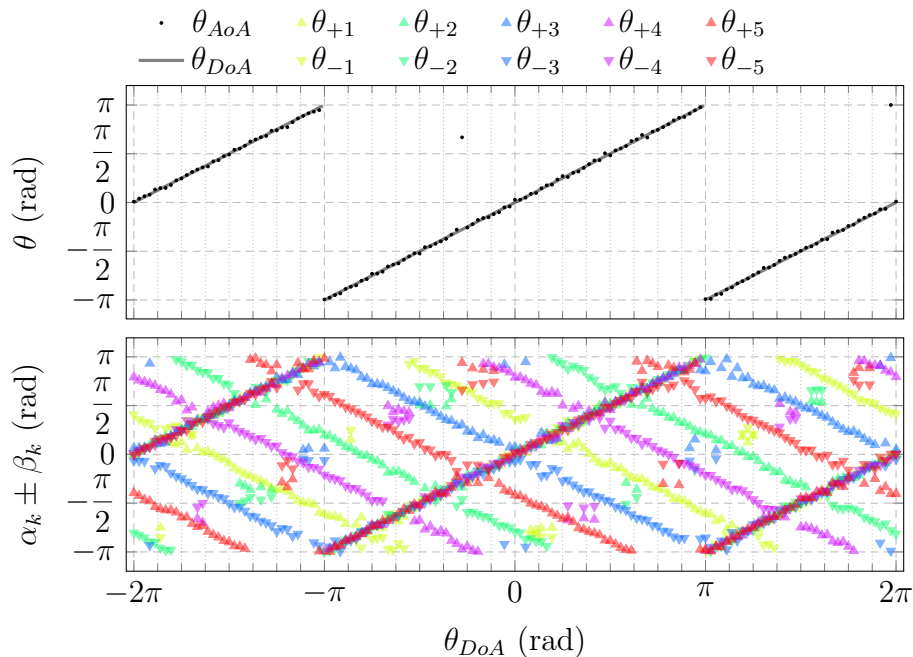
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

R^2 para cinco antenas

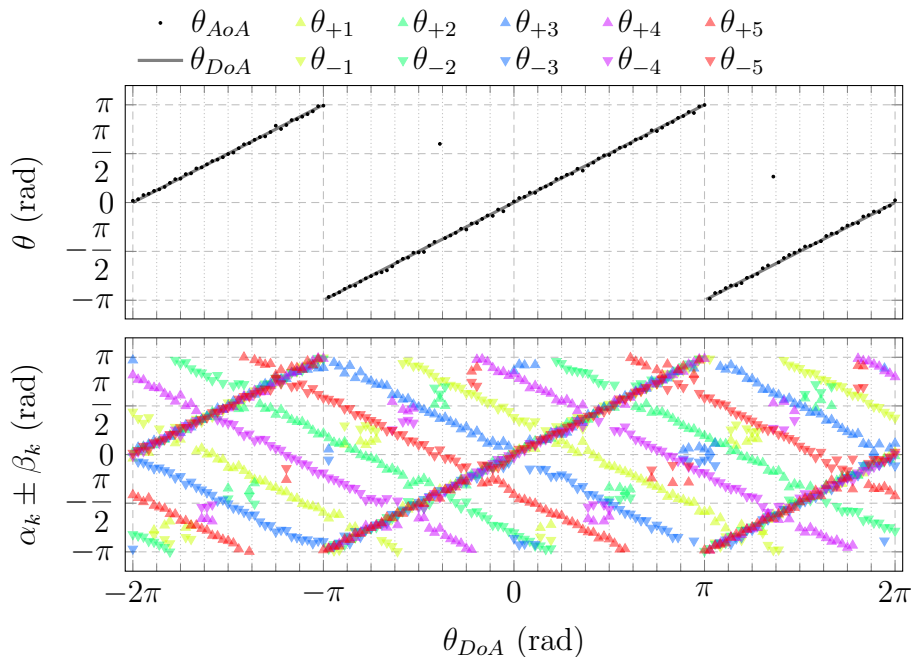
SNR (dB)	R^2 sem ATT (%)	R^2 com ATT (%)
∞	100,00	100,00
20	100,00	100,00
17	91,90	91,89
14	91,91	91,90
7	84,27	91,93
0	80,73	96,28



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).



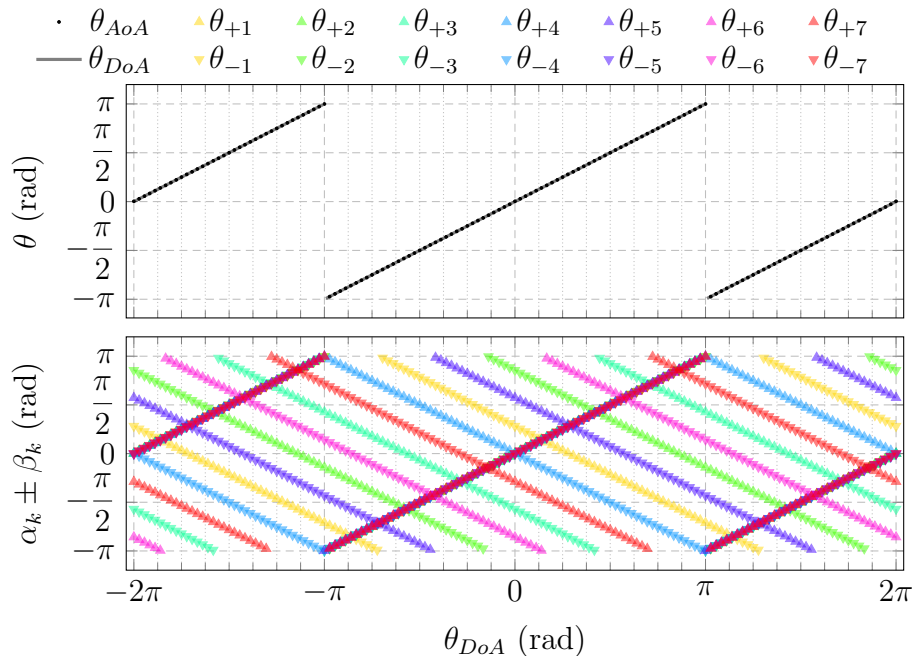
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).



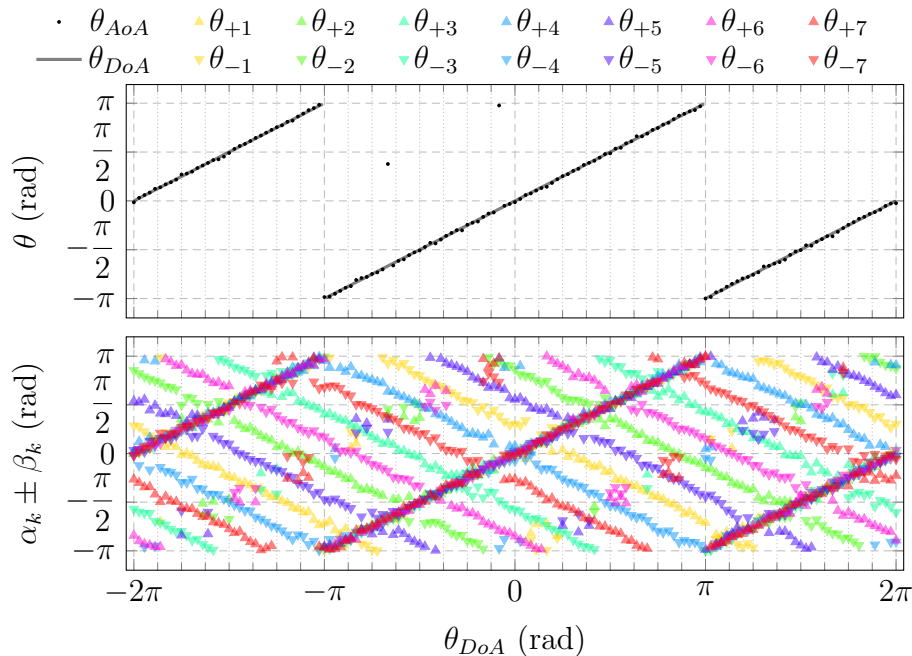
Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

R^2 para sete antenas

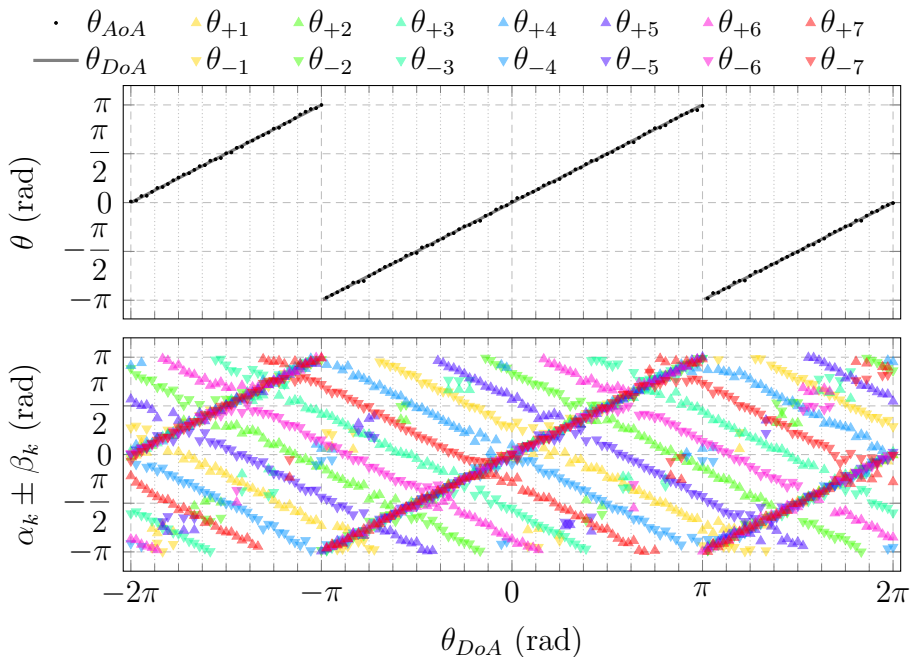
SNR (dB)	R^2 sem ATT (%)	R^2 com ATT (%)
∞	100,00	100,00
20	84,25	100,00
17	100,00	84,24
14	91,90	100,00
7	99,99	84,28
0	80,15	99,98



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).



Fonte: Autor, saída gráfica disponível em [GitHub](#).

Perguntas?

Obrigado!