



# **Introdução à Assimilação de Dados (MET 563-3)**

## **Motivação - Equação de Análise Empírica**

Dr. Carlos Frederico Bastarz  
Dr. Dirceu Luis Herdies

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia  
(PGMET) do INPE

22 de Setembro de 2025

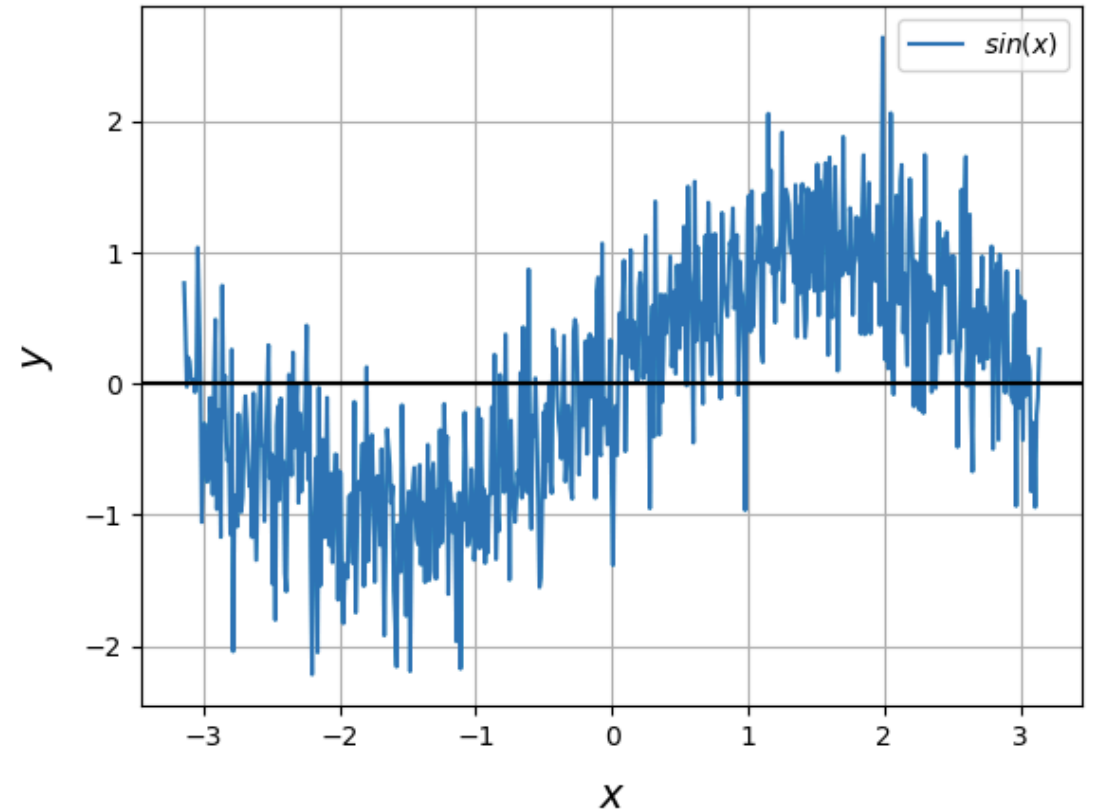
# Equação de Análise Empírica

## Motivação

- Esta é uma primeira aproximação para o problema de análise univariada
- Isto significa, na prática, que estamos tratando de um conjunto (ou uma série) de observações de uma mesma quantidade (e.g., temperatura)
- Considere um modelo matemático simples:

$$f(\mathbf{x}) = \sin(\mathbf{x}) + \varepsilon, \quad \varepsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2), \quad -\pi \leq x \leq \pi$$

- A função seno com a adição de um ruído normalmente distribuído



# Equação de Análise Empírica

## Motivação

- Suponha que possamos utilizar este modelo para ajustar uma curva produzida a partir de uma distribuição normal randômica utilizando uma **equação de análise empírica**:

$$\mathbf{x}_a = \alpha \mathbf{y}_o + (1 - \alpha) \mathbf{x}_b$$

- Onde:
  - $\mathbf{x}_a$ : é o vetor análise
  - $\mathbf{x}_b$ : é o vetor background
  - $\mathbf{y}_o$ : é o vetor observação
  - $\alpha$ : é um peso escalar dado à observação e ao background

# Equação de Análise Empírica

## O modelo

- Já sabemos que o nosso modelo é a função seno. Então, vamos definir um domínio para a nossa função. Seja  $\mathbf{x}_0$  um vetor com 629 elementos de 1 a 629:

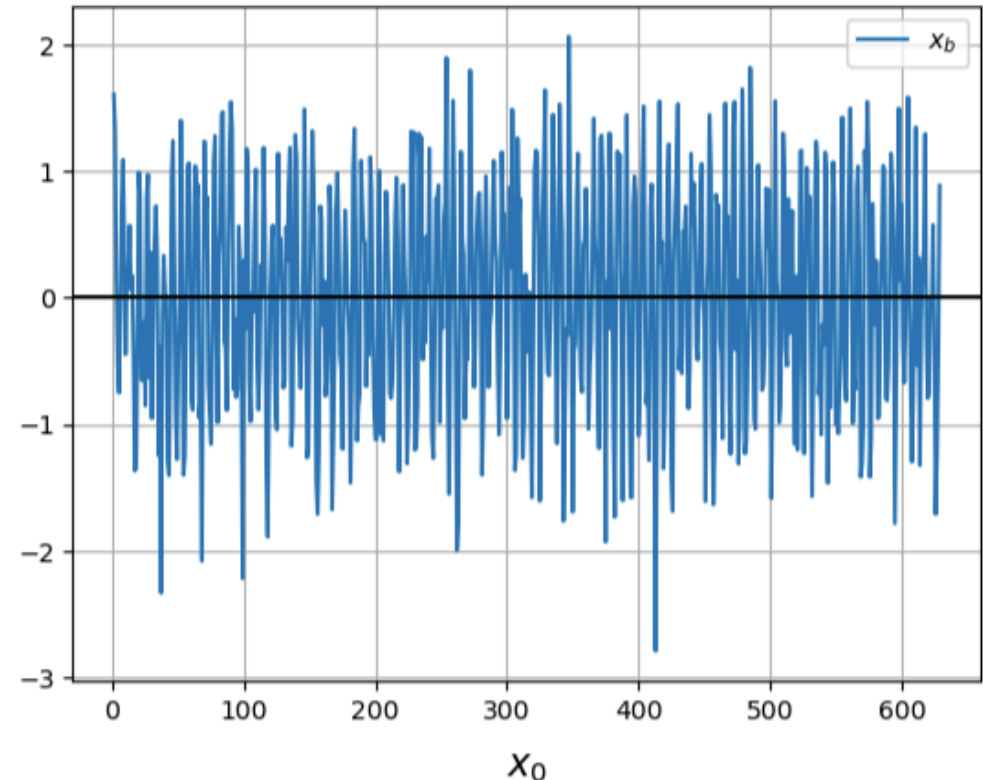
```
x0 = np.arange(1,630,1)
```

- Como nosso modelo é a função seno, vamos aplicar a função aos elementos do nosso domínio e vamos nomear de  $\mathbf{x}_b$  o vetor com a imagem da nossa função, ou melhor,  $\mathbf{x}_b$  é o nosso background:

```
xb = np.sin(x0) + ruido
```

## Como é $\mathbf{x}_b$ ?

```
xb =  
array([ 1.60624883e+00,  1.32688359e+00,  1.36485484e-01, -5.28018657e-01, ...  
       -1.70776972e+00, -1.23210461e+00, -4.33982552e-01,  8.86349535e-01])
```



# Equação de Análise Empírica

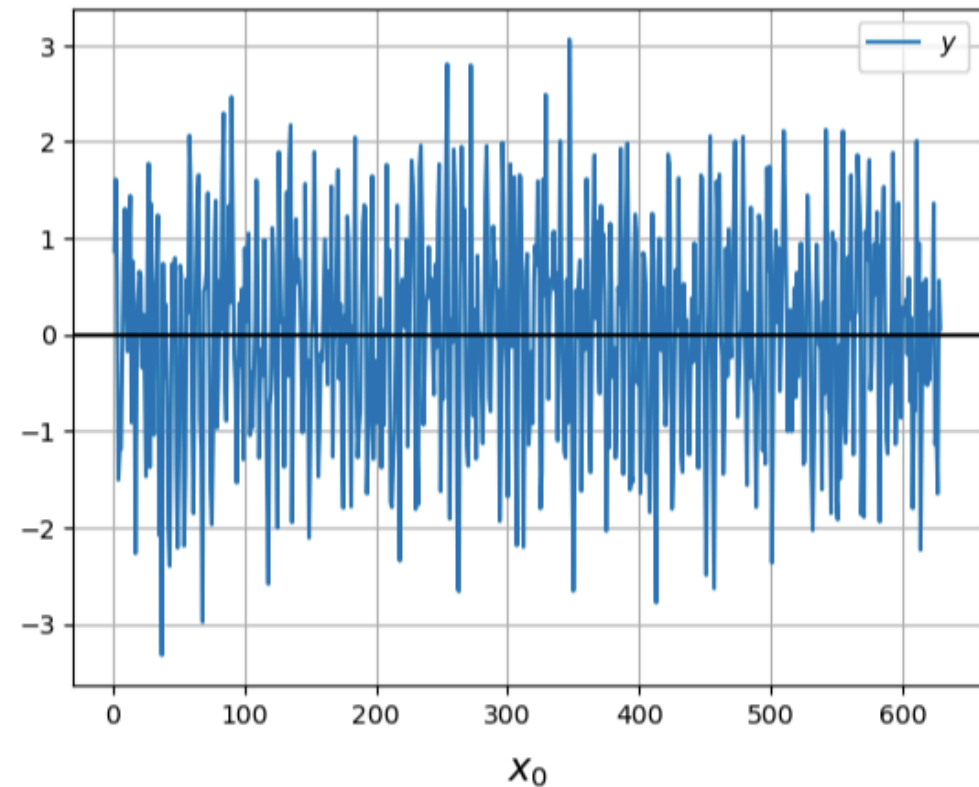
## As observações

- O vetor observação  $y_o$ , pode ser definido de forma semelhante ao vetor background  $x_b$ :

```
mu_true = 0
sigma_true = 1
s = np.random.normal(mu_true, sigma_true, 629)
y = xb + np.sin(s)
```

## Como é $y_o$ ?

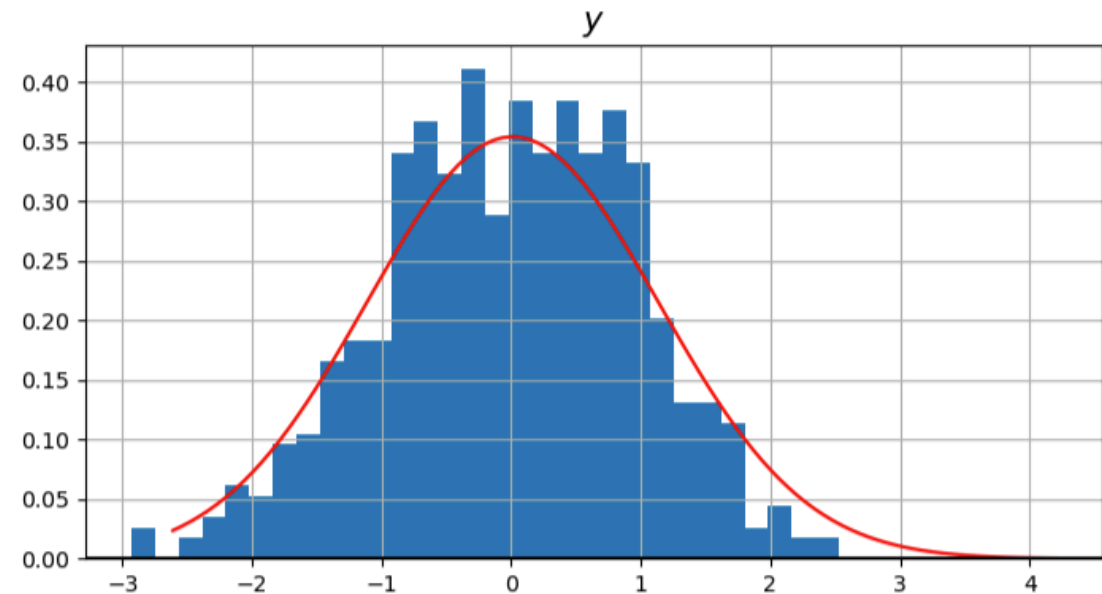
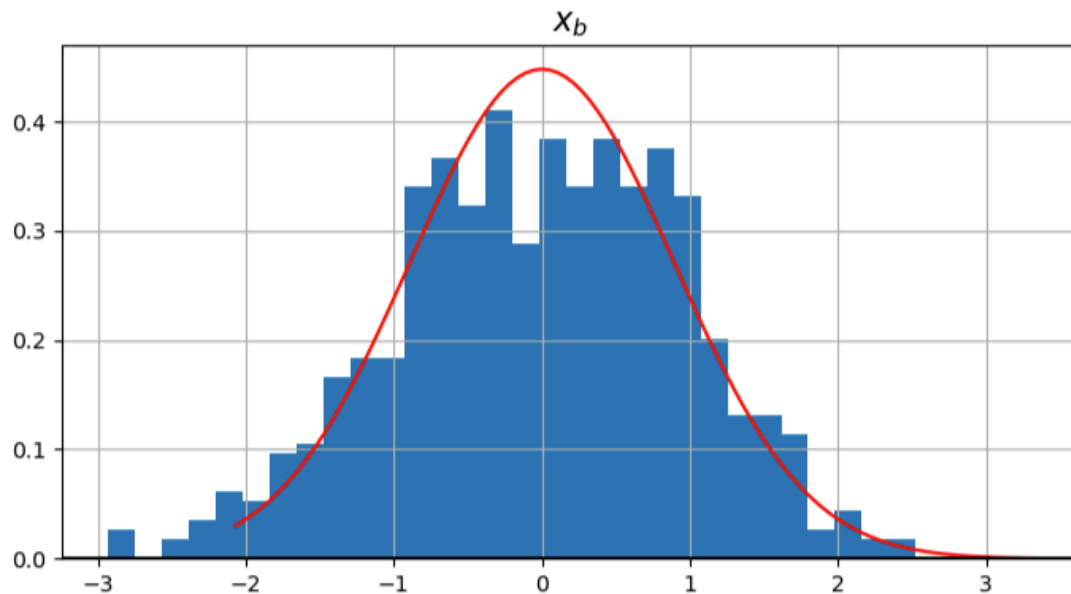
```
y =
array([ 8.63703635e-01,  1.61015360e+00,  5.87457172e-01, -1.50481750e+00, ...
        -9.50091116e-01, -1.64829028e+00,  5.60348293e-01,  5.84897816e-02])
```



# Equação de Análise Empírica

## Distribuição Normal

- Observe que ambos,  $x_b$  e  $y$ , possuem distribuição normal, isto é, ambos são representados por valores aleatórios distribuídos sobre uma curva normal com  $\mu_{x_b} = 0,0019$  e  $\sigma_{x_b} = 0,8909$  e  $\mu_y = -0.011$  e  $\sigma_y = 0.8563$ :



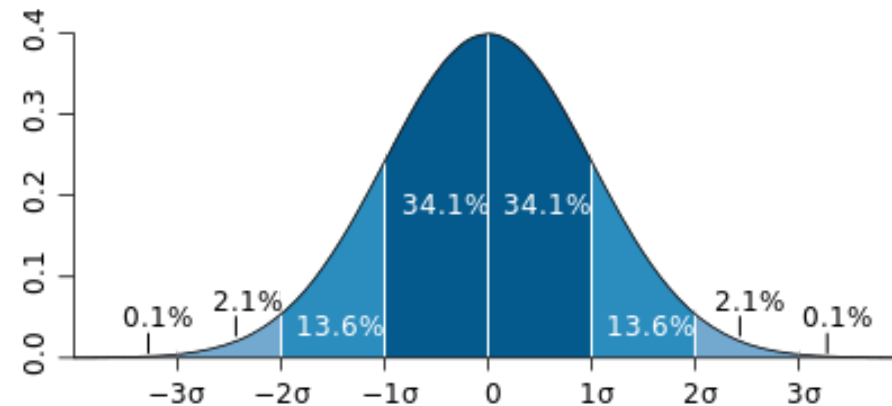
# Equação de Análise Empírica

## Distribuição Normal

- Estamos mantendo as distribuições de  $\mathbf{x}_b$  e  $\mathbf{y}_o$  próximas à distribuição normal, porque esta distribuição possui as seguintes propriedades:

$$f(\psi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\psi-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

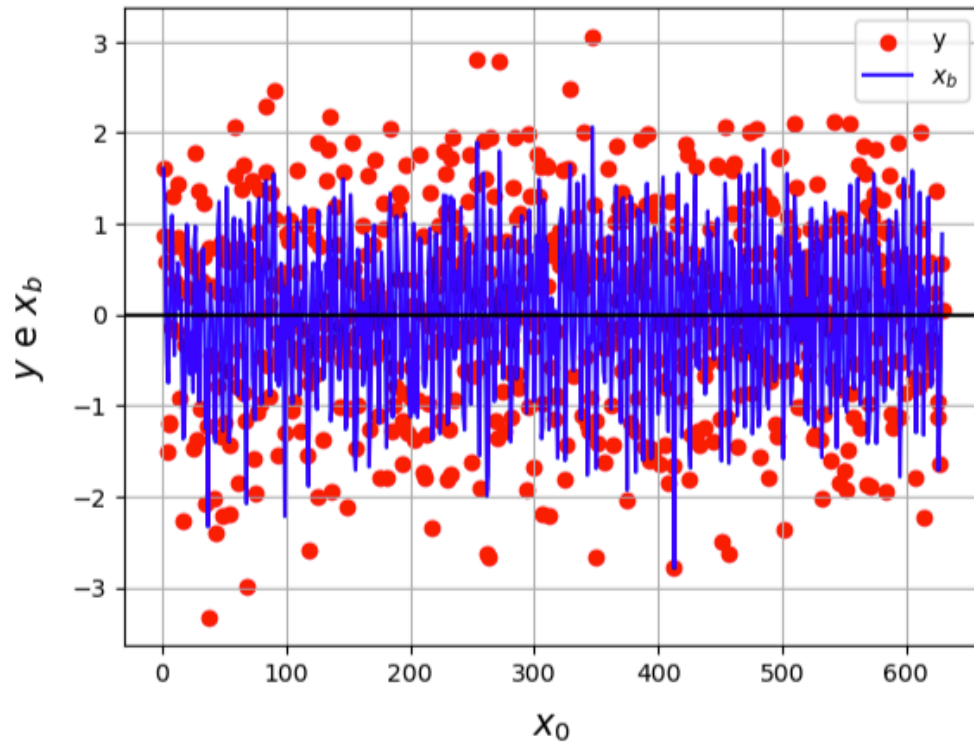
- ~68% dos valores encontram-se a uma distância da média inferior a um desvio-padrão
- ~95% dos valores encontram-se a uma distância da média inferior a duas vezes o desvio-padrão
- ~99,7% dos valores encontram-se a uma distância da média inferior a três vezes o desvio-padrão



# Equação de Análise Empírica

## Séries de $x_b$ e $y_o$

- Com  $x_b$  e  $y_o$  definidos, podemos plotar os seus elementos:





# Equação de Análise Empírica

## Equação de Análise Empírica

- Olhando para nossa equação de análise empírica, percebemos que os elementos  $\mathbf{x}_b$  e  $\mathbf{y}_o$  já estão definidos
- Ainda precisamos determinar o parâmetro  $\alpha$ , que é o peso a ser atribuído às observações
- $1 - \alpha$  é um outro peso que será atribuído ao background - **por que?**
- Uma vez determinado o valor de  $\alpha$ , determinaremos  $1 - \alpha$  e, conseqüentemente, o valor de  $\mathbf{x}_a$ , o vetor análise (representado da mesma forma que  $\mathbf{x}_b$  e  $\mathbf{y}_o$ ):

$$\mathbf{x}_a = \alpha \mathbf{y}_o + (1 - \alpha) \mathbf{x}_b$$

# Equação de Análise Empírica

## Determinação de $\alpha$

- Antes de determinarmos o parâmetro  $\alpha$ , precisamos saber o que ele é e como pode ser definido
- $\alpha$  é um parâmetro que relaciona as medidas das variâncias das parcelas:

$$\alpha = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_b^2 + \sigma_o^2}$$

- Onde:
  - $\sigma_b^2$  e  $\sigma_o^2$  são as variâncias do background e das observações
- Para calcular  $\alpha$ , precisamos calcular as variâncias dos vetores  $\mathbf{x}_b$  e  $\mathbf{y}_o$

# Equação de Análise Empírica

## Erros $E(\mathbf{x}_b)$ e $E(\mathbf{y}_o)$

- A variância é uma medida de dispersão
- Ela pode ser calculada com base no erro da distribuição dos valores
- Vamos fazer as seguintes considerações:
  1. Não há relação entre os elementos dos dois vetores  $\mathbf{x}_b$  e  $\mathbf{y}_o$
  2. Os erros dos elementos dos vetores  $\mathbf{x}_b$  e  $\mathbf{y}_o$  são radômicos, ou seja, não há relação entre os erros dos elementos do vetor background e entre os elementos do vetor observação

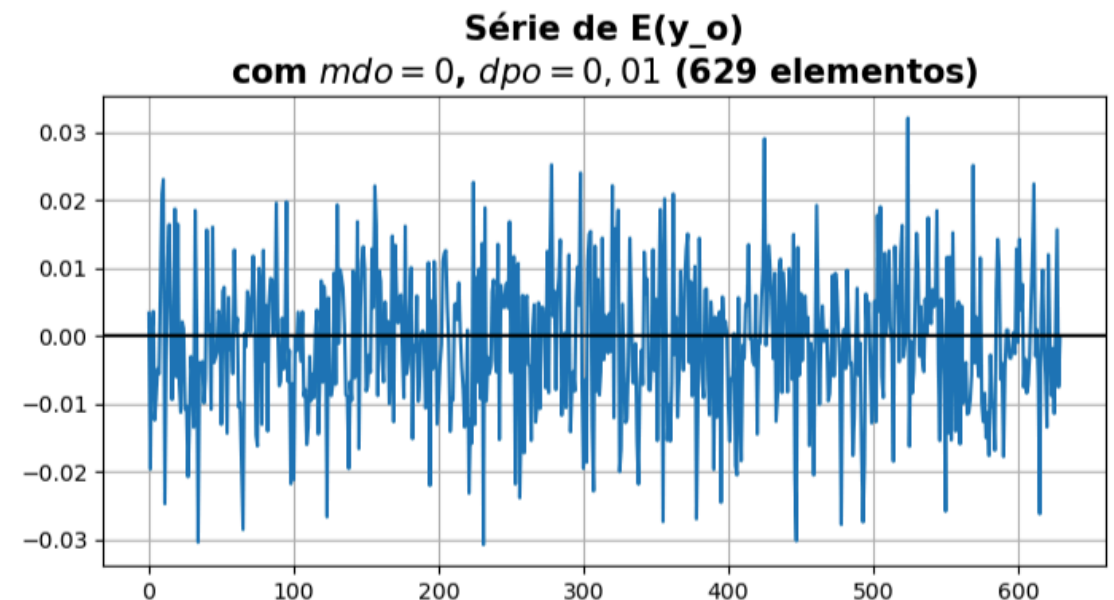
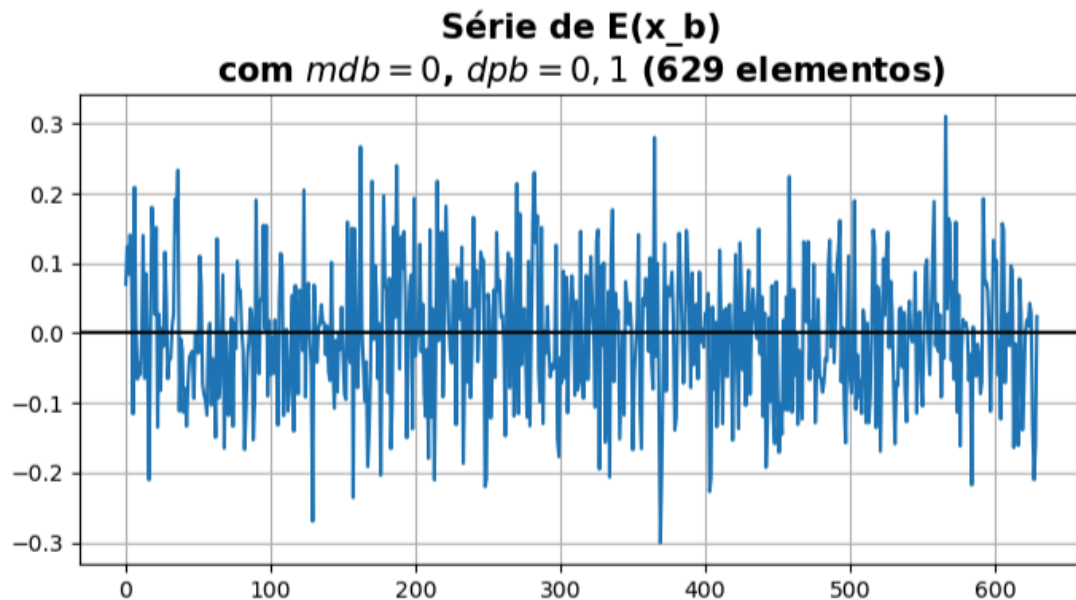
```
errb = mdb + dpb * np.random.randn(len(x0))  
erro = mdo + dpo * np.random.randn(len(x0))
```

- Onde:
  - $mdo$ : média da observação ( $\mu_o$ )
  - $mdb$ : média do background ( $\mu_b$ )
  - $dpo$ : desvio-padrão da observação ( $\sigma_o$ )
  - $dpb$ : desvio-padrão do background ( $\sigma_b$ )

# Equação de Análise Empírica

## Testando alguns valores de $\sigma_b$ e $\sigma_o$

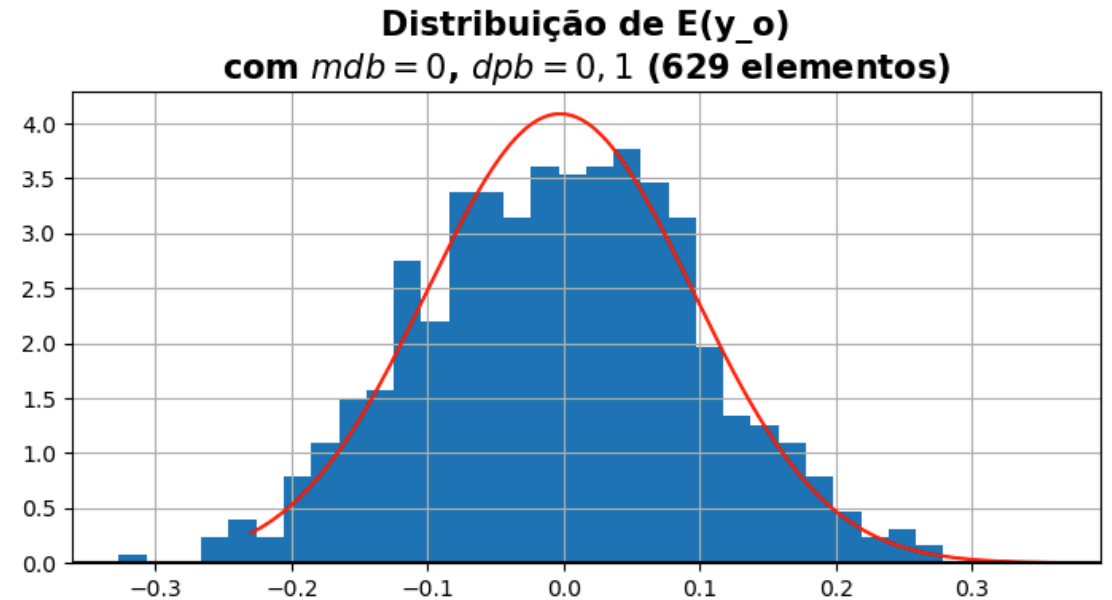
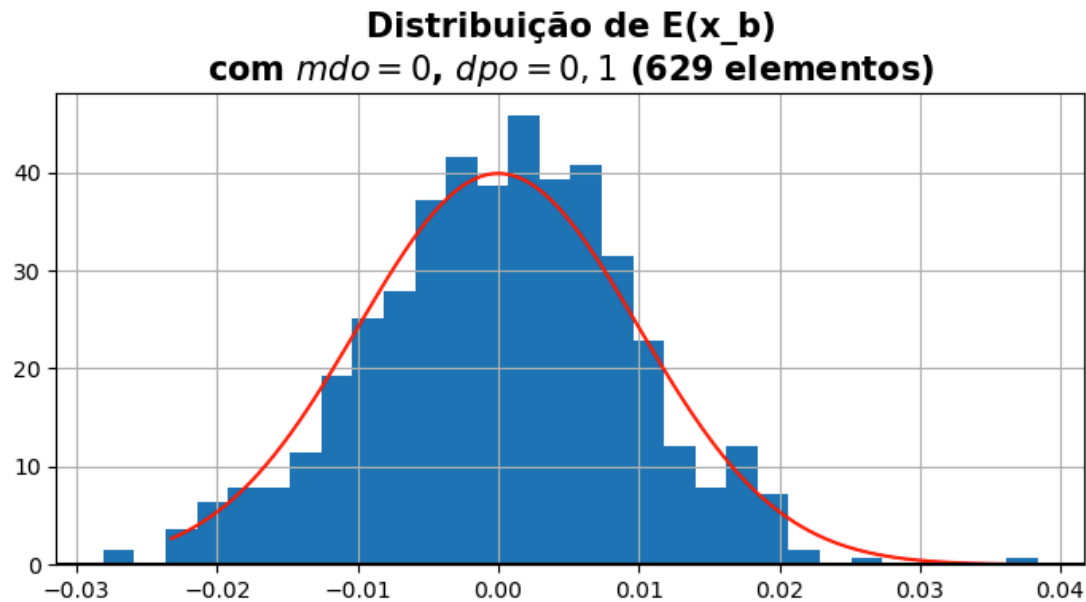
- Exemplo da série dos erros de background  $E(\mathbf{x}_b)$  e observação  $E(\mathbf{y}_o)$ :



# Equação de Análise Empírica

## Testando alguns valores de $\sigma_b$ e $\sigma_o$

- Exemplo da distribuição dos erros de background  $E(\mathbf{x}_b)$  e observação  $E(\mathbf{y}_o)$ :



# Equação de Análise Empírica

## Variância dos erros $\sigma_b^2$ e $\sigma_o^2$

- Dado que  $\alpha$  depende dos valores das variâncias das distribuições dos erros de background e observação, calculamos  $\sigma_b^2$  e  $\sigma_o^2$ :

```
sigmab2 = np.var(errb)  
sigmao2 = np.var(erro)
```

- Partindo-se dos valores das distribuições de  $E(\mathbf{x}_b)$  e  $E(\mathbf{y}_o)$ , obtemos as seguintes variâncias:

```
sigmab2 = 0.0095226361060977  
sigmao2 = 0.00011333207595536619
```

A variância dos erros de observação é muito menor do que a variância dos erros de background

# Equação de Análise Empírica

## Cálculo de $\alpha$

- Com os valores de  $\sigma_b^2$  e  $\sigma_o^2$ , o valor de  $\alpha$  é calculado:

```
alpha = sigmab2 / (sigmab2 + sigmao2)  
alpha = 0.9882386415340758
```

- Da equação de análise empírica, observamos que 99% do peso é dado para as observações, enquanto que 1% ( $1 - \alpha$ ) de peso é dado para o background

$$\mathbf{x}_a = \alpha \mathbf{y}_o + (1 - \alpha) \mathbf{x}_b$$

# Equação de Análise Empírica

## Cálculo de $x_a$

- Observando novamente a equação da análise, notamos que todos os parâmetros estão determinados:

$$\mathbf{x}_a = \alpha \mathbf{y}_o + (1 - \alpha) \mathbf{x}_b$$

- $\alpha$ : é um valor único ( $\alpha \approx 0,99$ )
- $\mathbf{y}_o$ : é um vetor com valores "observados" de apenas uma grandeza (e.g., temperatura)
- $\mathbf{x}_b$ : é um vetor com valores produzidos (calculados) por um modelo matemático (neste caso, a função seno adicionada de um ruído de distribuição próxima à Normal)



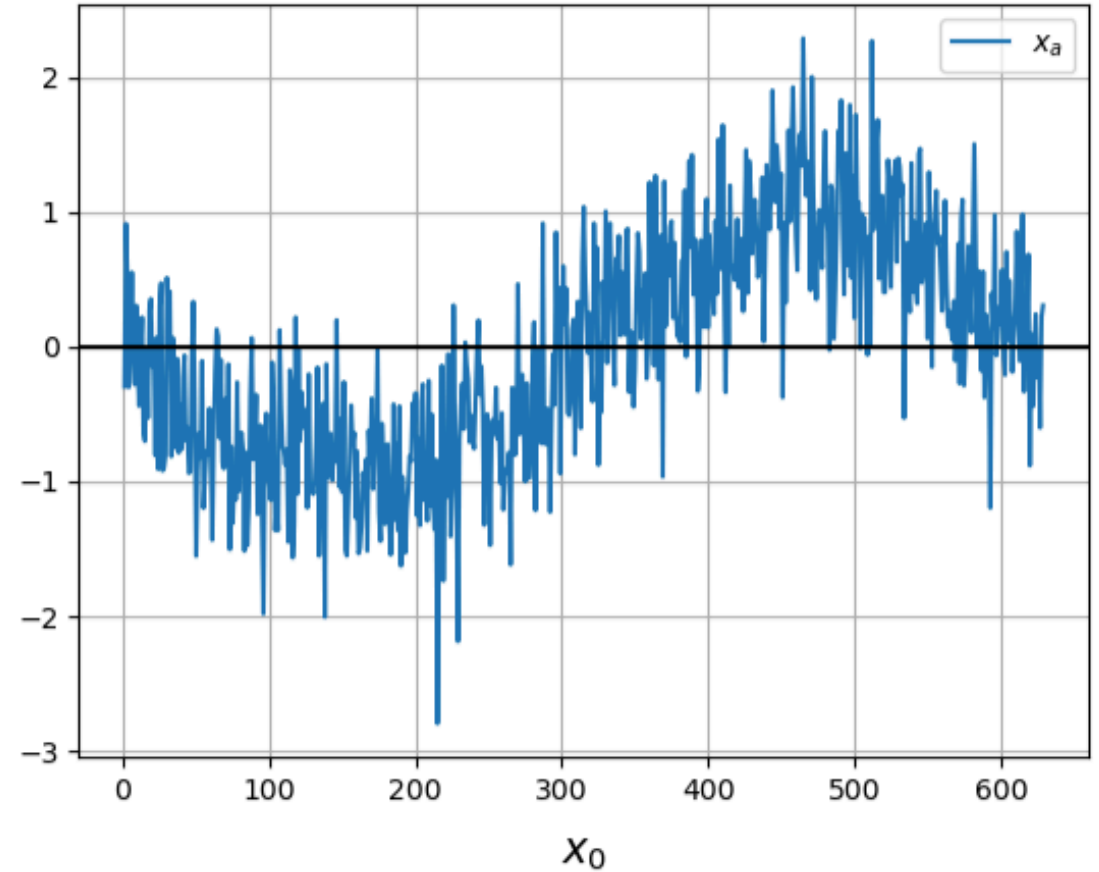
# Equação de Análise Empírica

## Cálculo de $x_a$

$$\mathbf{x}_a = \alpha \mathbf{y}_o + (1 - \alpha) \mathbf{x}_b$$

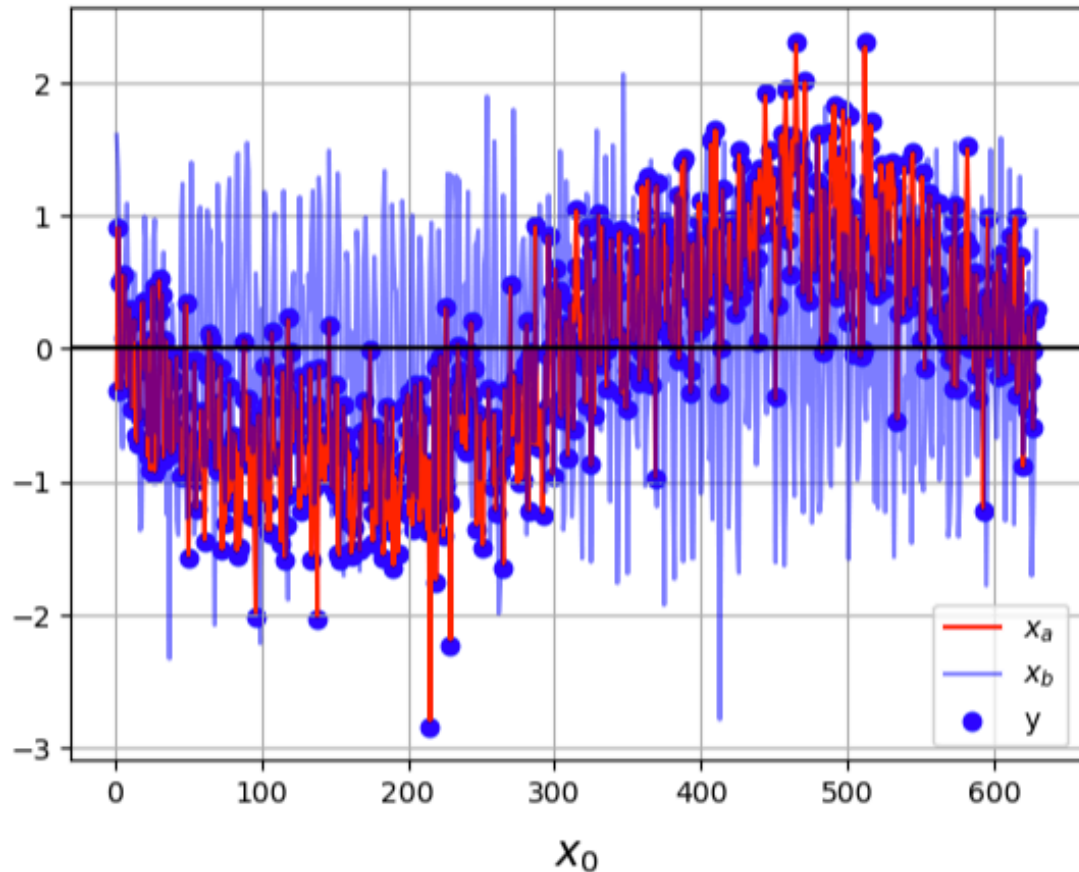
```
xa = alpha * y + (1 - alpha) * xb
```

```
xa =  
array([-2.97708719e-01,  9.10349665e-01,  4.99888690e-01, -3.03402470e-01, ...  
       -2.54933099e-02, -6.02816581e-01,  2.19151299e-01,  3.04442057e-01])
```



# Equação de Análise Empírica

## Plotando todos os resultados juntos



- Observe que a análise (curva vermelha) representa o ajuste do background (curva azul) às observações (pontos azuis)
- Quanto mais precisa a observação, melhor o ajuste

🎲 Notebook com [Atividade Prática 1](#)

# 🤔 Dúvidas

🔗 <https://cfbstarz.github.io/met563-3/>

👤 <https://github.com/cfbstarz/MET563-3>

✉️ [carlos.bastarz@inpe.br](mailto:carlos.bastarz@inpe.br)

