

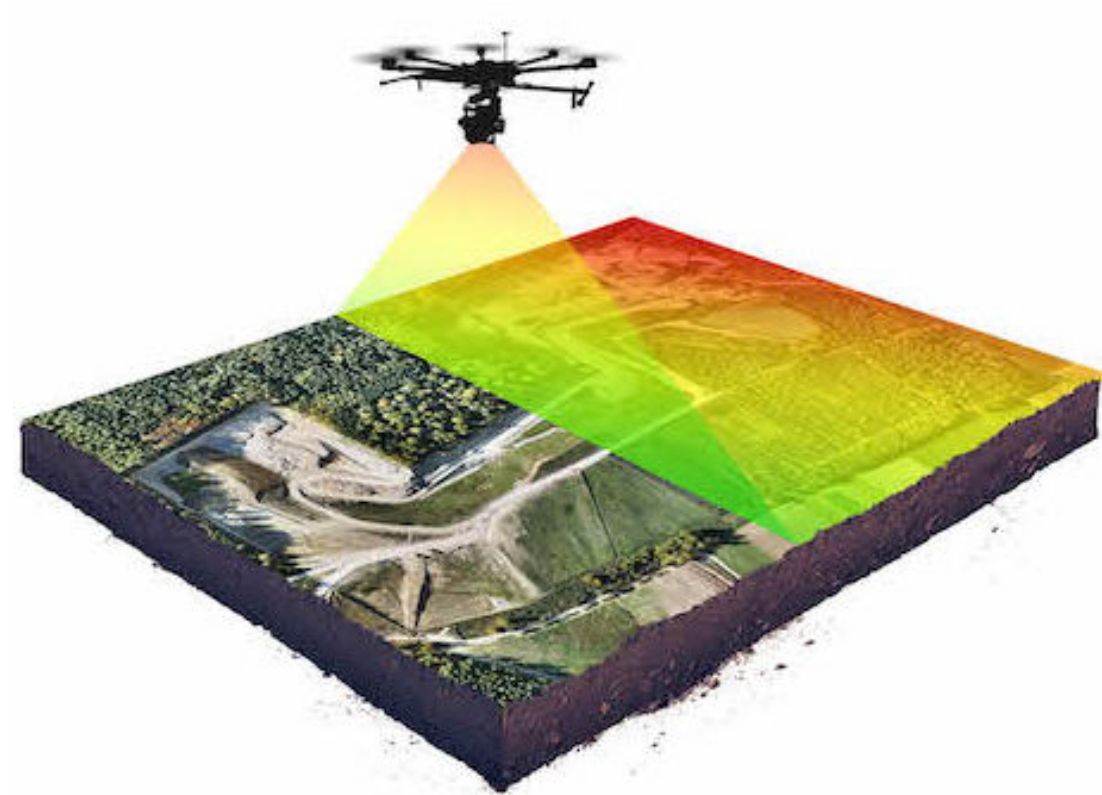
SEM5946 | SEM0576

Veículos Autônomos Aéreos

Aula #8: Sistemas Embarcados de Sensoriamento – Percepção – p1

Prof. Assoc. Marcelo Becker
becker@sc.usp.br

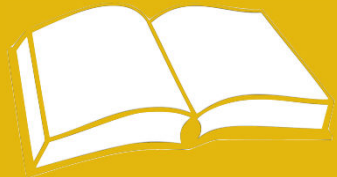
Prof. Dr. André Carmona Hernandez
andre.hernandes@ufscar.br



Fonte: <https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/>



Conteúdo



- Introdução

Introdução



- Sensores Embarcados

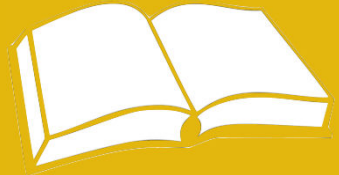
Percepção



- “Take-home messages”
- Próxima aula...

Conclusão

Conteúdo



- Introdução

Introdução

Percepção

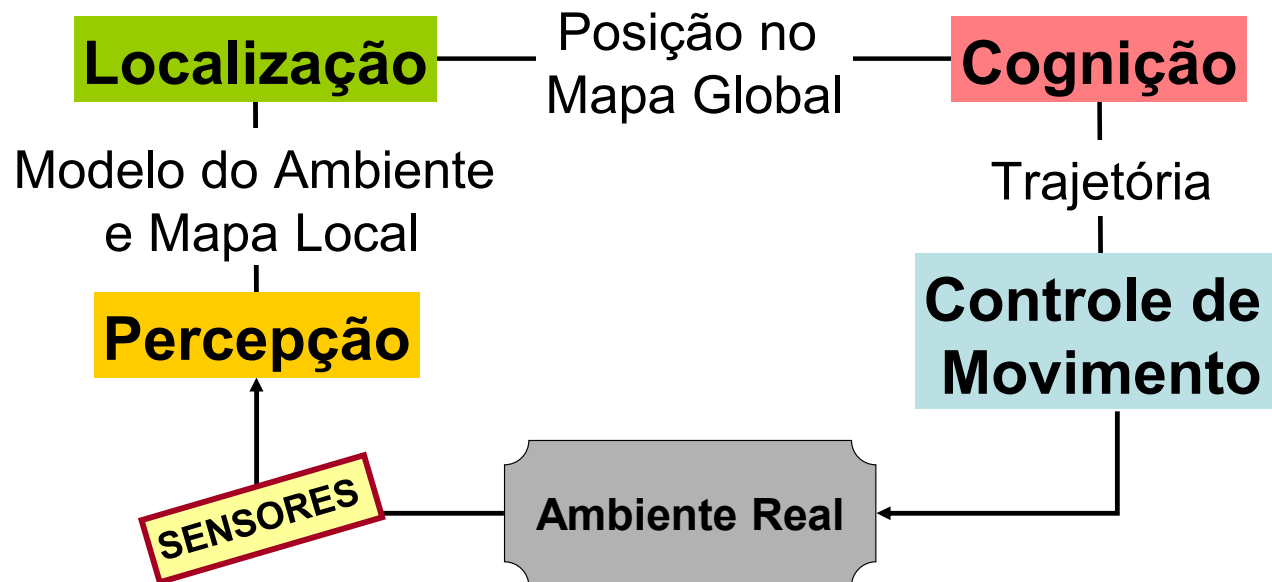
Conclusão

Introdução

- A Percepção é uma das tarefas mais importantes para qualquer tipo de robô
- Adquirir conhecimento sobre o ambiente envolve:
 - Obter dados (medidas) utilizando vários sensores
 - Extrair informação útil desses dados

Introdução

- Percepção lida diretamente com: Sensores, Incertezas e Informações.



Introdução

Exemplo:

- Parrot Bebop



Responsável por
detecções externas,
como a base
azul/amarela

Como a câmera funciona[[link](#)]?

Introdução

Exemplo:

- Parrot Bebop



Responsável por detectar o geo posicionamento -> alimenta o *loop* de posicionamento em ambientes externos

Como o GNSS funciona [\[link1\]](#)[\[link2\]](#)[\[link3\]](#)?

Introdução

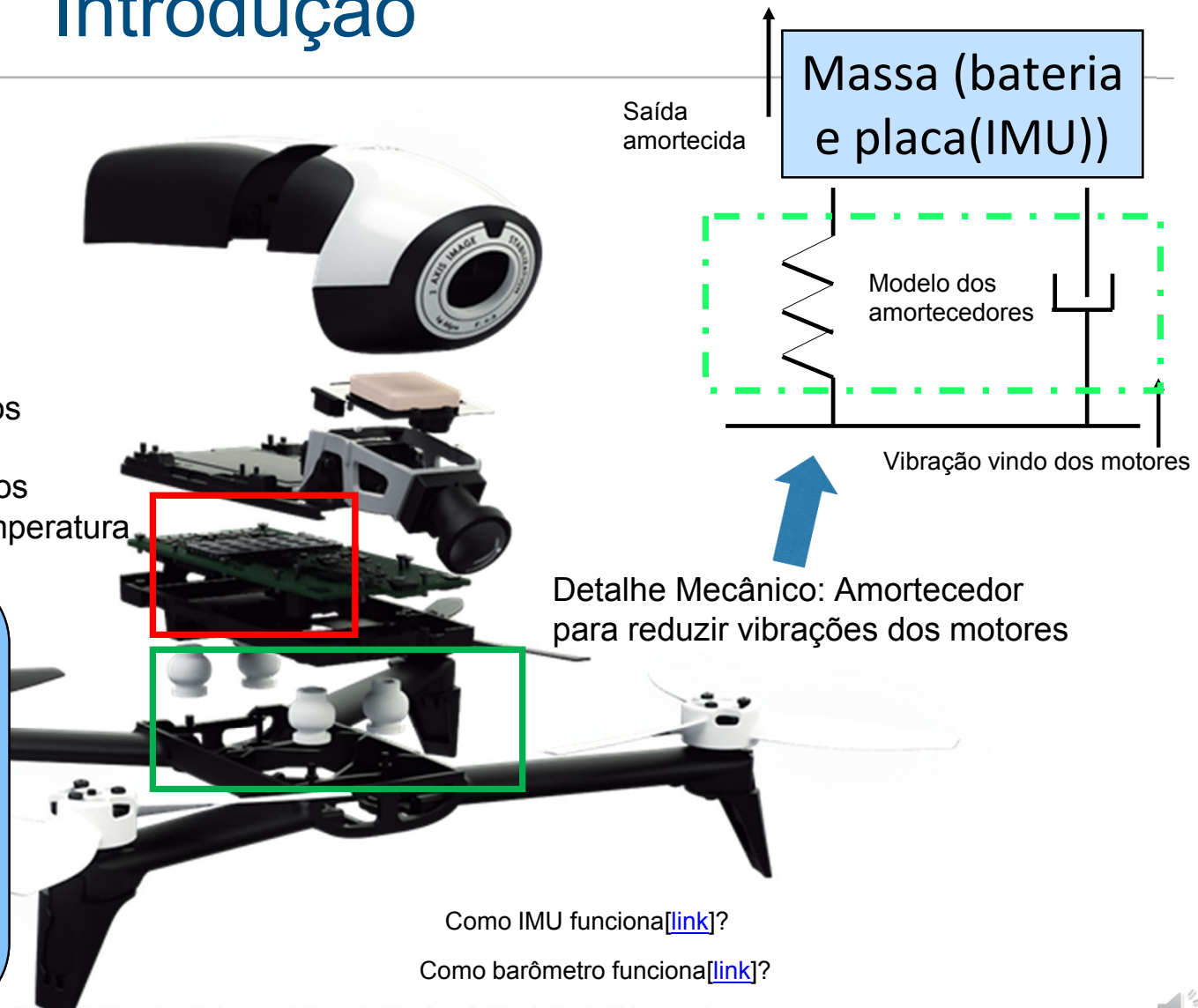
Exemplo:

- Parrot Bebop

IMU 10-DOF

- > Acelerômetro de 3 eixos
- > Giroscópio de 3 eixos
- > Magnetômetro de 3 eixos
- > Sensor de pressão/temperatura

Responsável por detectar as acelerações, velocidades angulares, orientação e altitude. Alimenta o *loop* de atitude



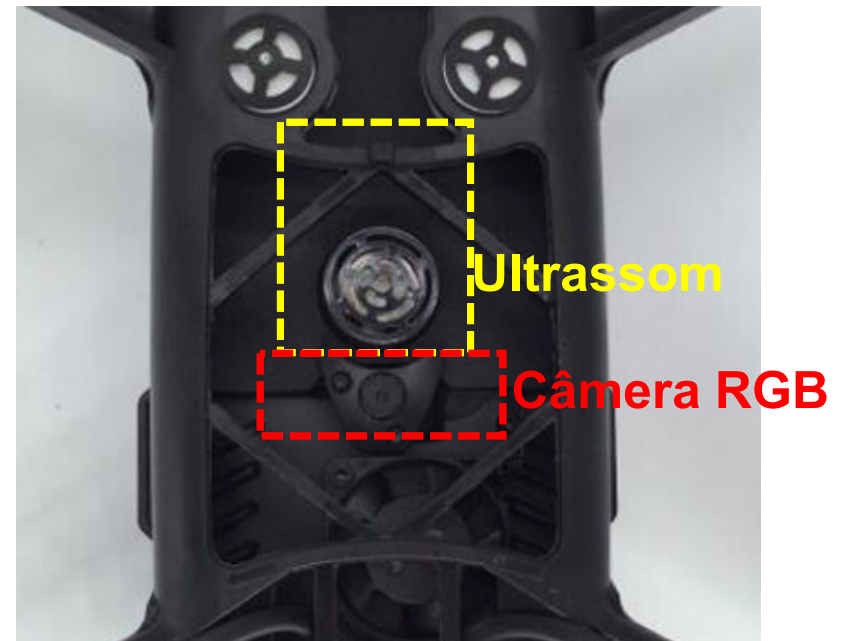
SEM5946 — Prof. Assoc. Marcelo Becker | Prof. André Hernandes

Introdução

Exemplo:

- Parrot Bebop

Responsável por detectar movimento relativo com relação ao solo e altura.



Como funciona ultrassom [\[link\]](#)?

Como funciona Lidar [\[link\]](#)?

Introdução

Introdução

Percepção

Conclusão

Exemplo:

- Parrot Bebop



Como funciona odometria visual [\[link\]](#)?

Conteúdo

Introdução



- Sensores Embarcados

Percepção

Conclusão

Classificação dos Sensores

Quanto ao tipo de medida:

- Proprioceptivos (*Proprioceptive*)
 - Medem valores internos ao robô
 - Velocidade do motor;
 - Carga nas rodas;
 - Ângulos de partes móveis;
 - Tensão na bateria, etc.
- Exteroceptivos (*Exteroceptive*)
 - Medem valores externos (estímulos externos)
 - Medidas de distância a objetos;
 - Luminosidade;
 - Amplitude de som, etc.

Classificação dos Sensores

Quanto à emissão de Energia:

- Passivos
 - A energia vem do próprio ambiente
 - Sensor de Temperatura;
 - Microfones;
 - Câmeras CCD ou CMOS, etc.
- Ativos
 - Emitem energia para o ambiente e depois medem sua reação. Apresentam uma performance melhor, mas são influenciados pelo ambiente.
 - Sensor Ultra-som, Sensor Laser, etc.

Classificação dos Sensores

- Mais comuns em veículos aéreos

Classificação Geral (uso típico)	Tipo de Tecnologia	Pr	E	A	Pa
Sensores de Direção (orientação do robô em relação a uma direção fixa)	Bússola		X		X
	Giroscópio	X			X
	Inclinômetro (derivação acelerômetro)		X	X	X
Sensores baseados em um "Farol" (orientação do robô em relação a uma referência fixa)	GPS		X	X	
Sensores de Alcance Ativo (triangulação reflexiva, por tempo de voo ou geométrica)	Sensores Ultra-sônicos		X	X	
	Laser		X	X	
Sensores baseados em Visão (alcance de visão, reconhecimento de objetos, etc.)	Câmera CCD / CMOS		X		X

Pr – Proprioceptivo; E – Exteroceptivo; A – Ativo; Pa - Passivo

Classificação dos Sensores

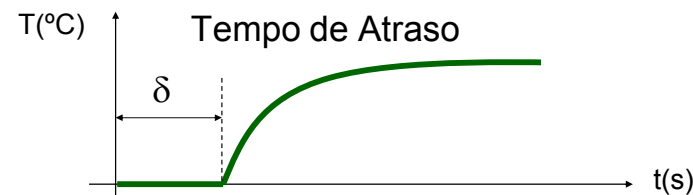
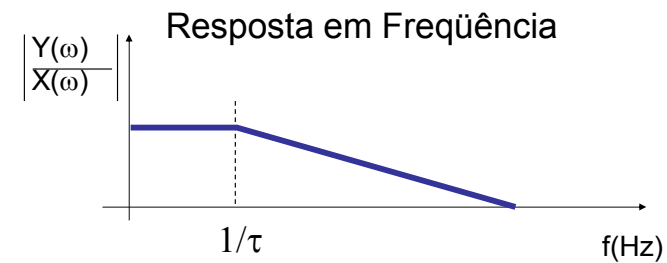
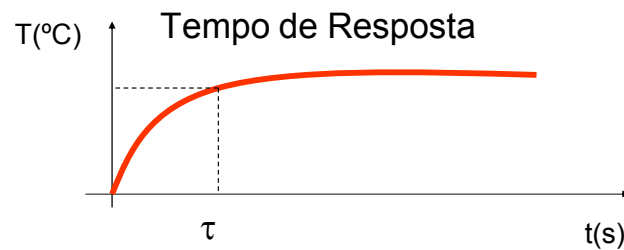
Desempenho:

- Varia com o tipo e a tecnologia empregada no sensor e com o ambiente onde o robô está inserido.
- As tabelas anteriores foram arranjadas em ordem crescente de complexidade e decrescente em maturidade tecnológica.
- Quantificação da acuidade dos sensores:
 - Características Básicas: laboratório.
 - Características “*in-situ*”: ambiente.

Características dos Sensores

Características Básicas

- Podem ser quantificadas em taxas e medidas em laboratório
- **Dinâmicas:** resposta em frequência, tempo de atraso, etc.



Características dos Sensores

Características Básicas

- **Alcance Dinâmico** (*dynamic range*): mede o espalhamento entre os limites superior e inferior do sinal de entrada para os quais o sensor mantém o seu funcionamento normal. Pode ser expresso em dB (potências).
 - Exemplo 1: potência medida de 1mW a 20W:
$$R_d = 10 \cdot \log(R_{\max}/R_{\min}) = 10 \cdot \log(20/0,001) = \mathbf{43dB}$$
 - Exemplo 2: tensão medida de 1mV a 20V:
$$R_d = 20 \cdot \log(R_{\max}/R_{\min}) = 20 \cdot \log(20/0,001) = \mathbf{86dB}$$

Tensão tem seu quadrado
proporcional à potência

Características dos Sensores

Características Básicas

- **Resolução:**
- menor variação do valor de entrada que pode ser detectado pelo sensor. Em geral, o menor valor medido pelo sensor é a sua resolução (sensores analógicos). Em sensores digitais, é determinada pelo conversor A/D.
- Exemplo: sensor linear (0~5V) com conversor de 8bits
 2^8-1 possíveis valores, ou seja: $5V/255 = \mathbf{20mV}$

Características dos Sensores

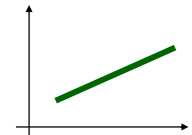
Características Básicas

- **Linearidade:** medida do comportamento do sinal de saída do sensor com a variação do sinal de entrada. Uma resposta linear indica que:

- 2 entradas x e y resultam em 2 saídas $f(x)$ e $f(y)$, onde:

$$f(ax + by) = a.f(x) + b.f(y)$$

- Menos importante para sinais processados por computadores...



Características dos Sensores

Características Básicas

- **Largura de Banda:** é empregada para medir a velocidade com a qual o sensor pode fornecer um fluxo de leituras
 - Medida em Hz
 - Devido à natureza do seu movimento, robôs móveis geralmente têm sua velocidade limitada pela largura de banda de seus sensores de desvio de obstáculos...
 - O desenvolvimento de Sistemas de Visão com alta largura de banda têm sido almejado...

Características dos Sensores

Características “*In-Situ*”

- Necessitam da compreensão do ambiente real.
- Geralmente relacionadas a sensores sofisticados:
 - Sensores de alcance ativo: laser, ultra-som, etc
 - Sensores de interpretação visual: câmera CCD.



Características dos Sensores

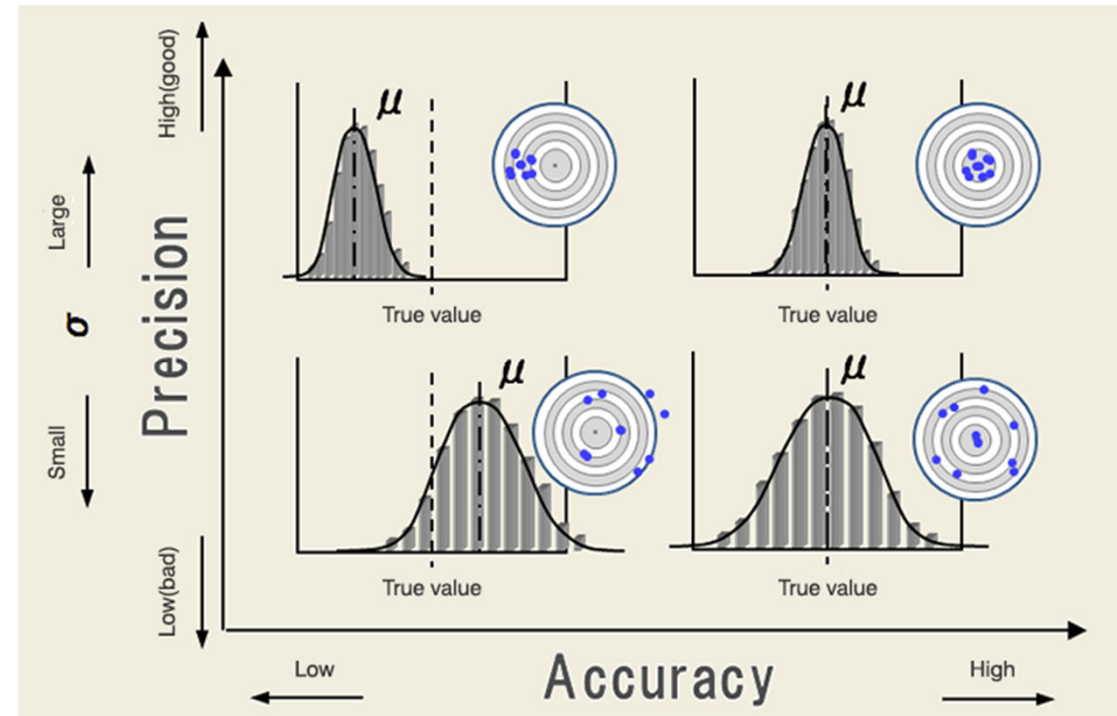
Características “*In-Situ*”

- **Sensibilidade:** medida do grau com o qual uma mudança incremental no sinal de entrada altera o sinal de saída.
- **Sensibilidade-cruzada:** sensibilidade a parâmetros diferentes daqueles que são medidos pelo sensor
 - Exemplo: bússola magnética é sensível à presença de materiais ferrosos
- **Erro:** diferença entre o valor real e o mostrado pelo sensor

Características dos Sensores

Características “In-Situ”

- **Acurácia/Exatidão:** grau de conformidade entre a medida do sensor e o valor real.
- **Precisão:** reproducibilidade dos resultados dos sensores.



<https://www.hitachi-hightech.com/global/products/device/semiconductor/accuracy-precision.html>

Características dos Sensores

Características “*In-Situ*”

- **Erros Sistemáticos:** causados por fatores que podem ser modelados. São determinísticos, logo, previsíveis. Ex.: calibração incorreta.
- **Erros Aleatórios:** não podem ser previstos, mas podem ser representados em termos probabilísticos. Ex.: ruído na câmera, instabilidade no sensor, etc.

Características dos Sensores

Caracterização do Erro

- Robôs móveis devem observar, analisar e interpretar o ambiente em que está.
- Medidas em ambientes reais são dinâmicas e propensas a erros.
- Exemplos:
 - Mudanças na iluminação;
 - Superfícies que absorvem som ou luz;
 - Sensibilidade cruzada do sensor à uma posição do robô, ou ao ambiente, etc.
 - Escorregamento

Características dos Sensores

Modelagem dos Erros

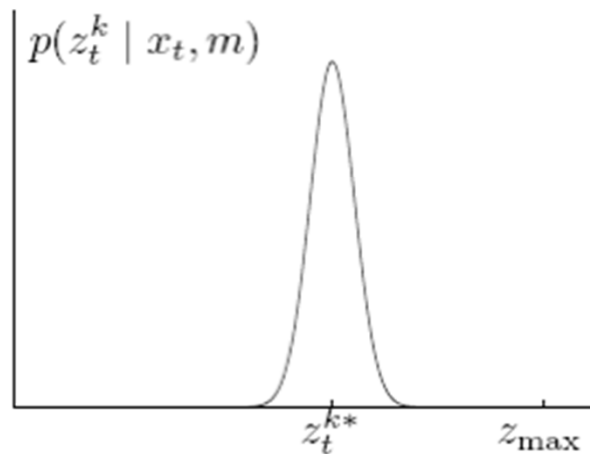
- Sensores modelados através de distribuições de probabilidade (erros aleatórios)
- Em geral tem-se poucas informações sobre as fontes de erros aleatórios.
- Assume-se que sejam simétricos e, até mesmo, Gaussianos.
- Nem sempre isso é verdade...
 - Exemplo: no sensor de ultra-som, os erros não são simétricos.

Características dos Sensores

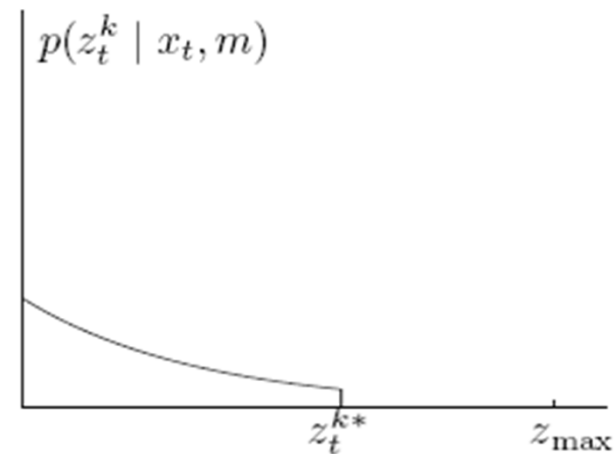
Modelagem dos Erros

- Exemplos de Modelagens Probabilísticas

(a) Gaussian distribution p_{hit}



(b) Exponential distribution p_{short}



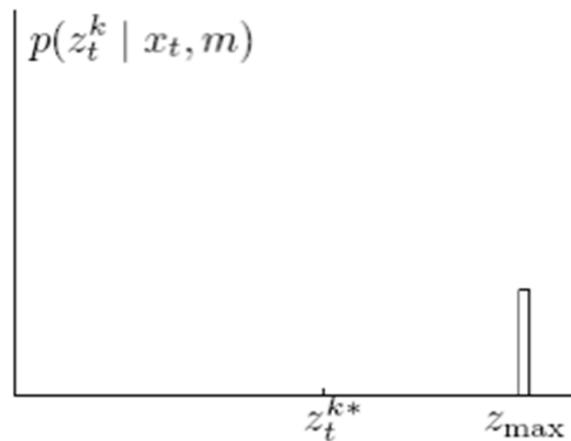
Fonte: [Probabilistic Robotics, Thrun, Burgard & Fox, 2000]

Características dos Sensores

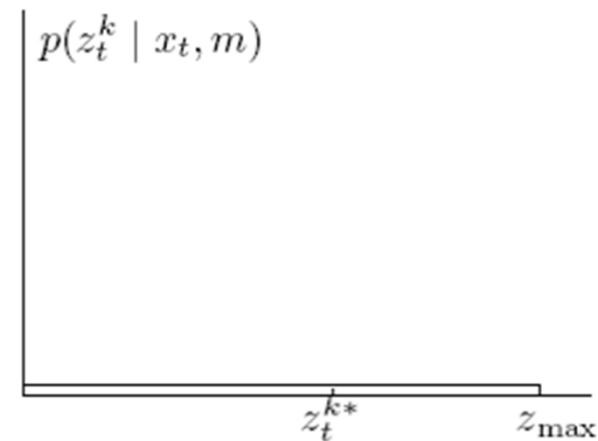
Modelagem dos Erros

- Exemplos de Modelagens Probabilísticas

(c) Uniform distribution p_{\max}



(d) Uniform distribution p_{rand}

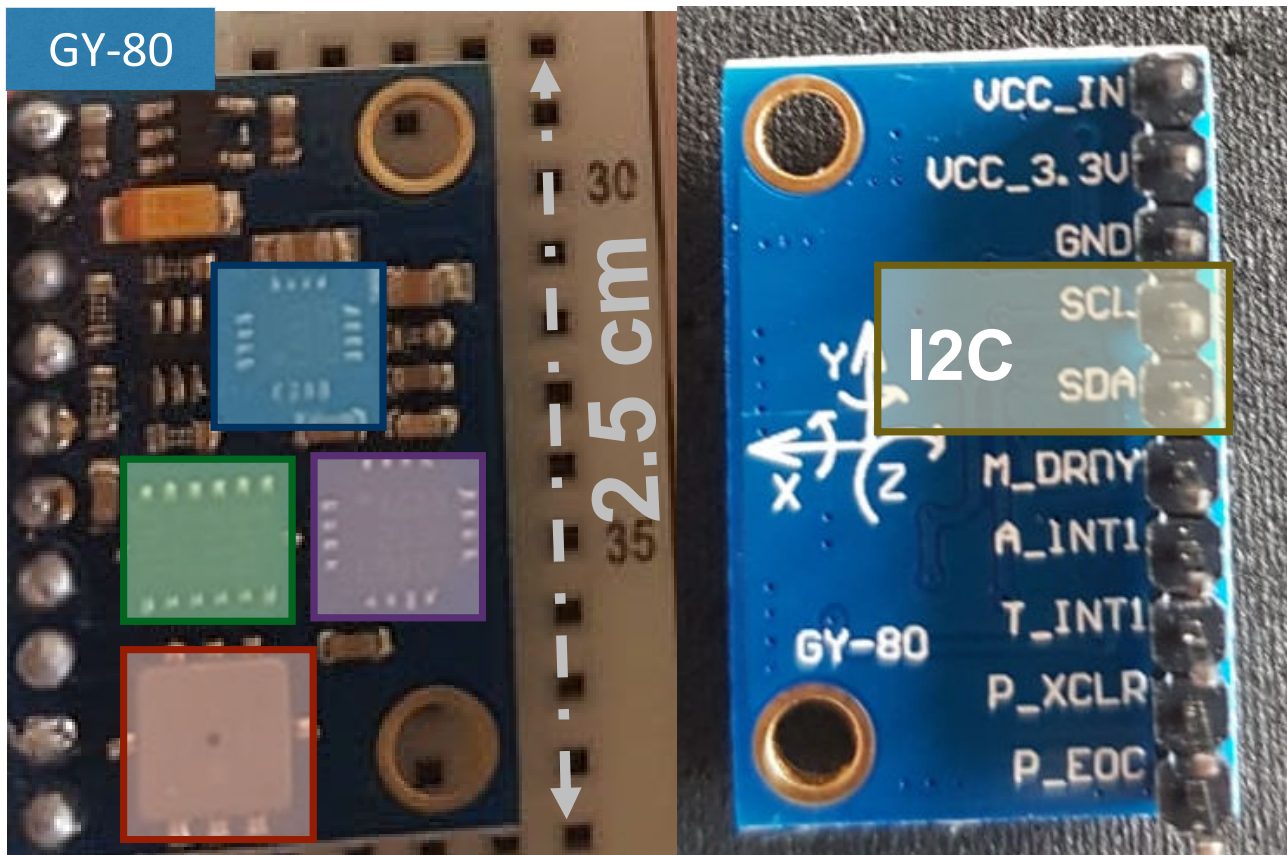


Fonte: [Probabilistic Robotics, Thrun, Burgard & Fox, 2000]

Características dos Sensores

Introdução
Percepção
Conclusão

Estudo de caso



Bússola digital:
Hmc5883l – 3 eixos

Pressão/Temperatura:
bmp085

Acelerômetro digital:
adxl345 – 3 eixos

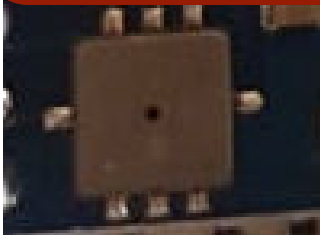
Giroscópio digital:
L3g4200d – 3 eixos

Características dos Sensores

Introdução

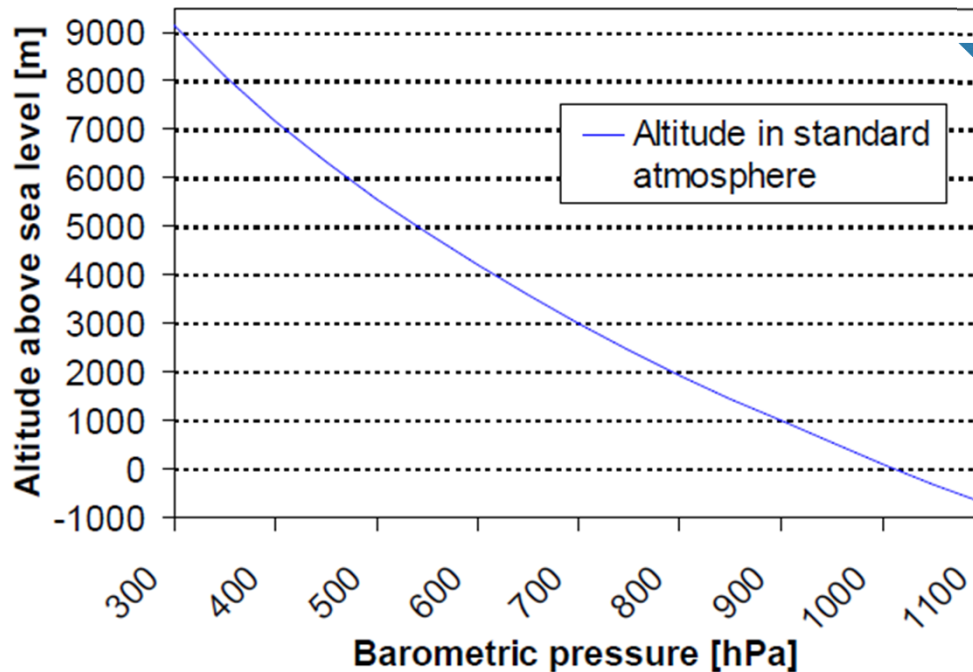
Estudo de caso

Pressão/Temperatura:
bmp085



Classificação – Passivo, exteroceptivo
(temperatura e pressão externa)

Sensor de
altitude!



$$\text{altitude} = 44330 * \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right)$$

$$P_0 = 101325 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = 1 \text{ Pa} \Rightarrow 8.3 \text{ cm}$$

Percepção

Conclusão

Características dos Sensores

Estudo de caso

Pressão/Temperatura:
bmp085



Características Básicas – Alcance Dinâmico

$$R_d = 20 \cdot \log(R_{\max}/R_{\min})$$

$$R_d = 20 \cdot \log\left(\frac{110000}{30000}\right)$$

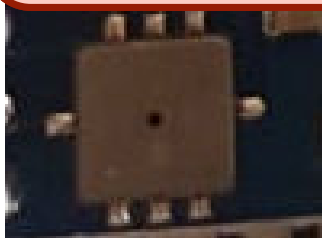
$$R_d = 11.3 \text{ dB}$$

Características dos Sensores

Estudo de caso

Características Básicas – Resolução

Pressão/Temperatura:
bmp085



Resolution of output data		pressure		0.01		hPa
		temperature		0.1		°C

$$\Delta p = 1 \text{ Pa} \Rightarrow 8.3 \text{ cm}$$

Tempo de resposta depende do modo de operação!

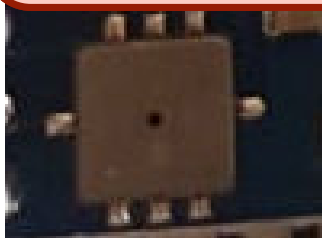
Conversion time temperature	t_{C_temp}	standard mode		3	4.5	ms
	$t_{c_p_low}$	ultra low power mode		3	4.5	ms
Conversion time pressure	$t_{c_p_std}$	standard mode		5	7.5	ms
	$t_{c_p_hr}$	high resolution mode		9	13.5	ms
	$t_{c_p_luhr}$	ultra high res. mode		17	25.5	ms

Características dos Sensores

Estudo de caso

Características Básicas – Linearidade

Pressão/Temperatura:
bmp085



calculate true temperature

$$\begin{aligned} X1 &= (UT - AC6) * AC5 / 2^{15} \\ X2 &= MC * 2^{11} / (X1 + MD) \\ B5 &= X1 + X2 \\ T &= (B5 + 8) / 2^4 \end{aligned}$$

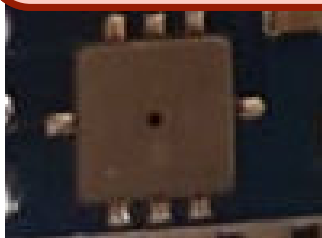
calculate true pressure

$$\begin{aligned} B6 &= B5 - 4000 \\ X1 &= (B2 * (B6 * B6 / 2^{12})) / 2^{11} \\ X2 &= AC2 * B6 / 2^{11} \\ X3 &= X1 + X2 \\ B3 &= ((AC1 * 4 + X3) \ll \text{oss} + 2) / 4 \\ X1 &= AC3 * B6 / 2^{13} \\ X2 &= (B1 * (B6 * B6 / 2^{12})) / 2^{16} \\ X3 &= ((X1 + X2) + 2) / 2^2 \\ B4 &= AC4 * (\text{unsigned long})(X3 + 32768) / 2^{15} \\ B7 &= ((\text{unsigned long})UP - B3) * (50000 \gg \text{oss}) \\ \text{if } (B7 < 0x80000000) \{ p &= (B7 * 2) / B4 \} \\ \text{else } \{ p &= (B7 / B4) * 2 \} \\ X1 &= (p / 2^8) * (p / 2^8) \\ X1 &= (X1 * 3038) / 2^{16} \\ X2 &= (-7357 * p) / 2^{16} \\ p &= p + (X1 + X2 + 3791) / 2^4 \end{aligned}$$

Características dos Sensores

Estudo de caso

Pressão/Temperatura:
bmp085



$\pm 1 \text{ hPa} = 8.3 \text{ m}$

Características Básicas –Acurácia

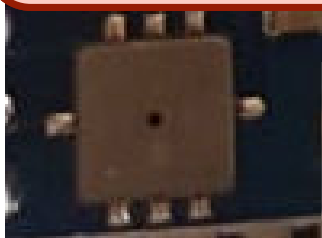
Absolute accuracy pressure $V_{DD} = 3.3V$	700 ... 1100 hPa 0 ... +65 °C	-2.5	±1.0	+2.5	hPa
	300 ... 700 hPa 0 ... +65 °C	-3.0	±1.0	+3.0	hPa
	300 ... 1100 hPa -20 ... 0 °C	-4.0	±1.5	+4.0	hPa
Absolute accuracy temperature $V_{DD} = 3.3V$	@ 25 °C	-1.5	±0.5	+1.5	°C
	0 ... +65 °C	-2.0	±1.0	+2.0	°C
Solder drifts	Minimum solder height 50µm		±1.0		hPa
Long term stability	12 months		±1.0		hPa
Relative accuracy pressure $V_{DD} = 3.3V$	700 ... 1100 hPa @ 25 °C		±0.2		hPa
	0 ... 65 °C @ p const.		±0.5		hPa

Características dos Sensores

Estudo de caso

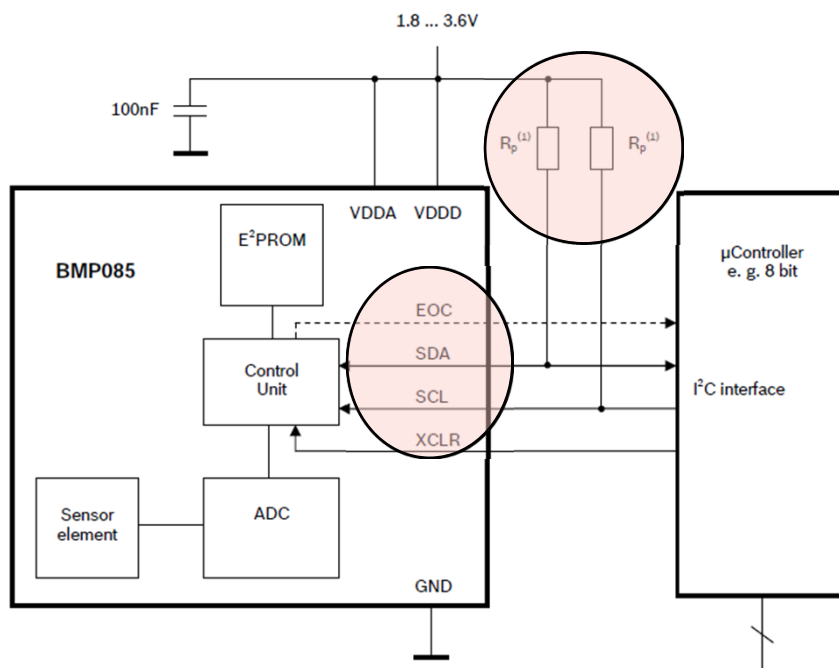
Características Básicas – Largura de banda

Pressão/Temperatura:
bmp085



<https://www.youtube.com/watch?v=6lAkYpmA1DQ>

Para entender como pode ser feito um fluxo de medidas, vejamos como funciona o protocolo I²C.



A implementação física do I²C exige que SDA e SCL sejam *open-drain*. Isso permite que mais sensores estejam ligados ao mesmo barramento, entretanto, há a necessidade de resistores de *pull-up*

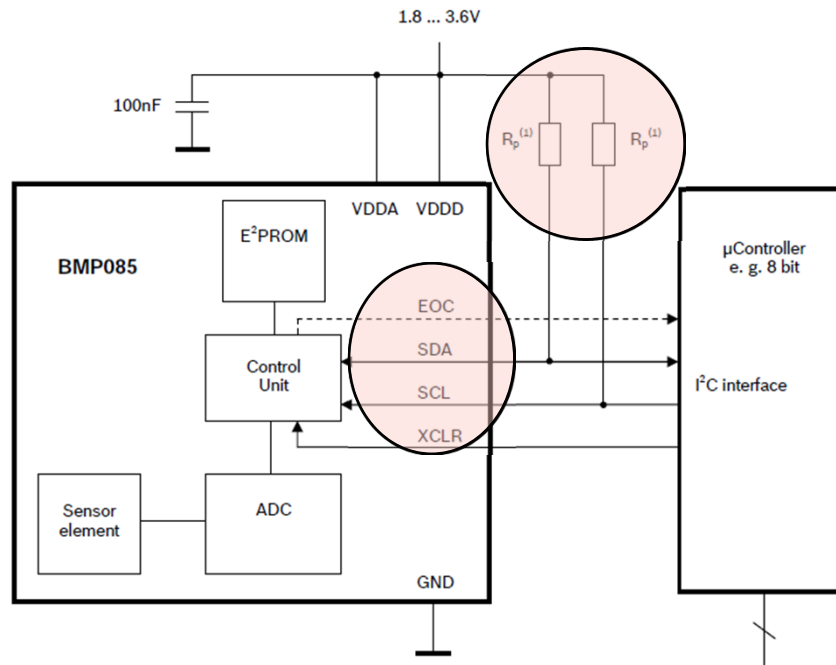
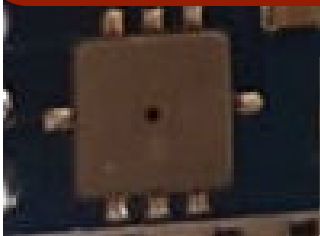
Características dos Sensores

Estudo de caso

Características Básicas – Largura de banda

Pressão/Temperatura:
bmp085

Portanto, é preciso avisar ao sensor desejado que se quer algum dado!

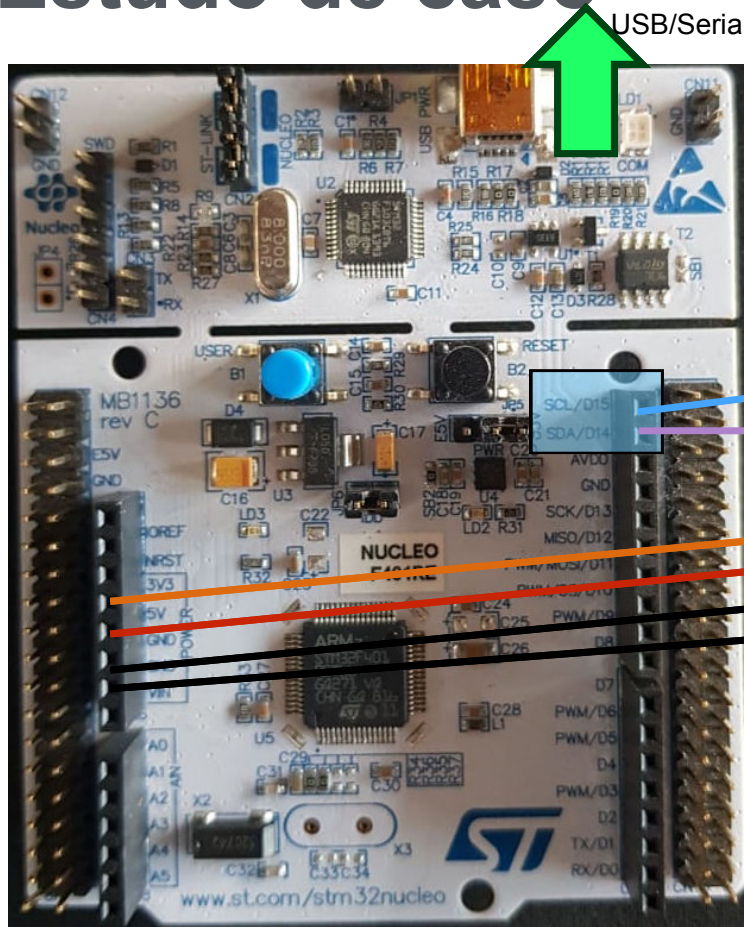


Características dos Sensores

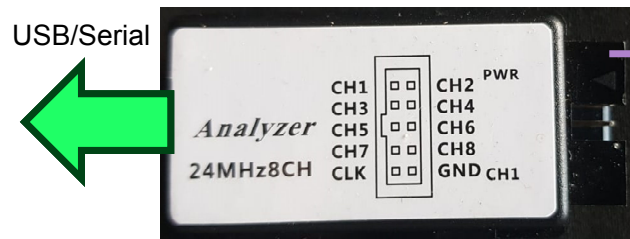
Introdução
Percepção
Conclusão

Estudo de caso

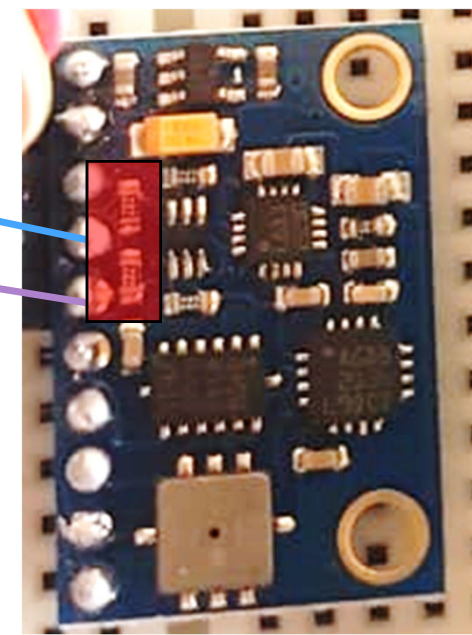
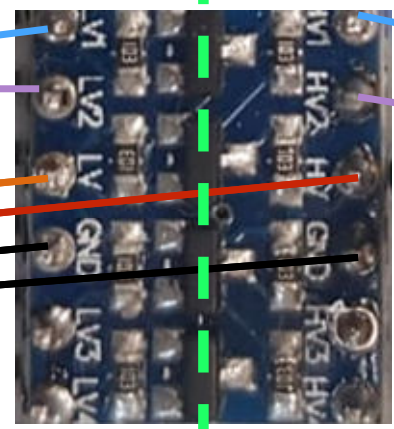
Experimento -> Largura de banda e *In situ*



USB/Serial



USB/Serial



5V

3.3V

pull-up conectado internamente

2k2 pull-up

Características dos Sensores

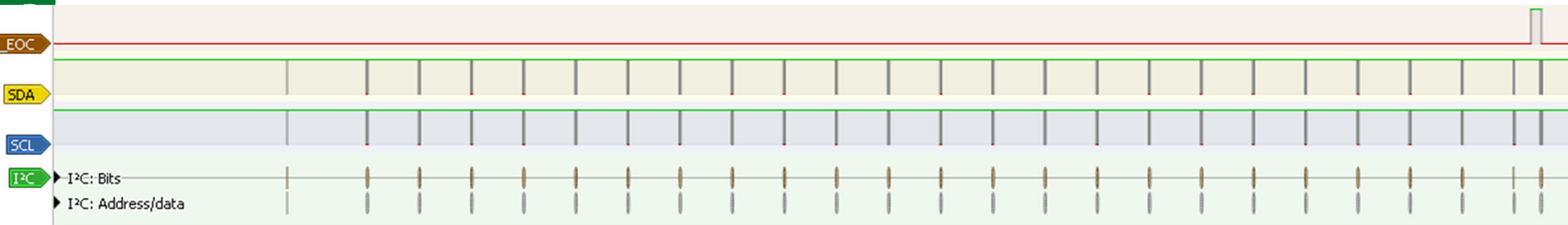
Estudo de caso

Características Básicas – Largura de banda

Logic Analyzer -> Visão Geral do Código

Introdução

Conclusão



Características dos Sensores

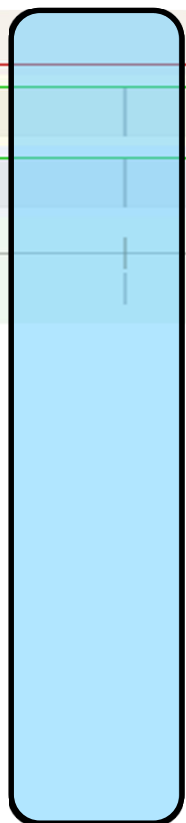
Estudo de caso

Logic Analyzer -> Visão Geral do Código

Introdução

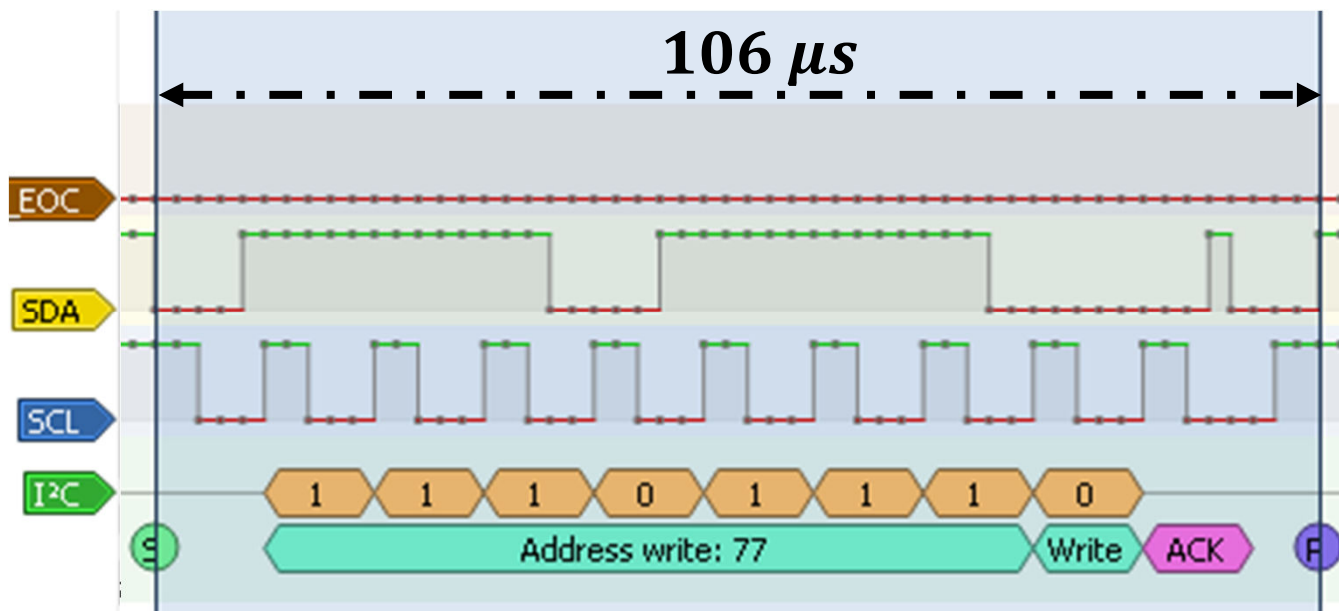
Percepção

Conclusão



100 kHz

Verifica a Conexão

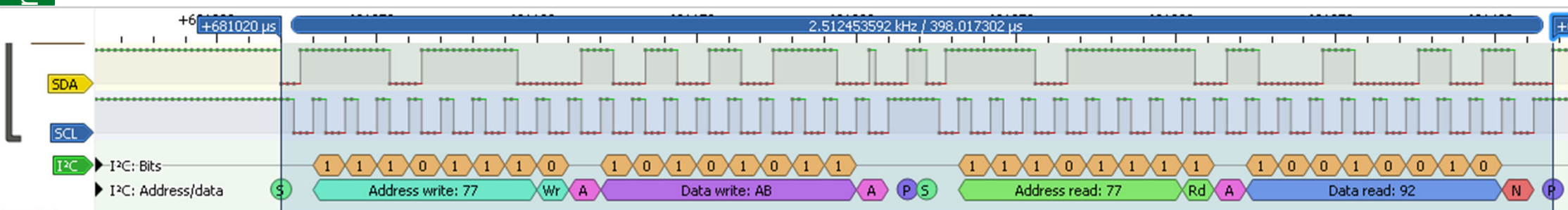
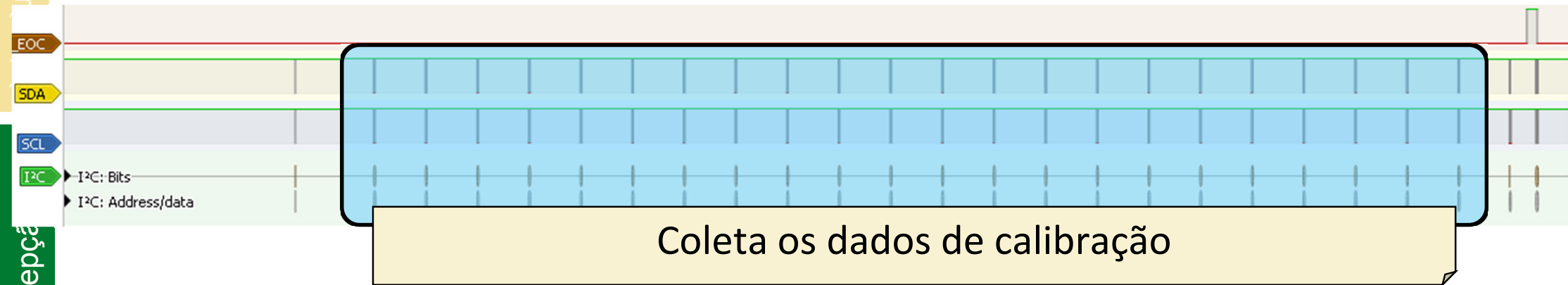


Características dos Sensores

Estudo de caso

Logic Analyzer -> Visão Geral do Código

Introdução
Recepção
Conclusão



Conclusão

Características dos Sensores

Estudo de caso

Logic Analyzer -> Visão Geral do Código

Introdução

Percepção

Conclusão

Começa as leituras – 1) pede o dado

3.473373343 kHz / 287.904553 µs



Sensor

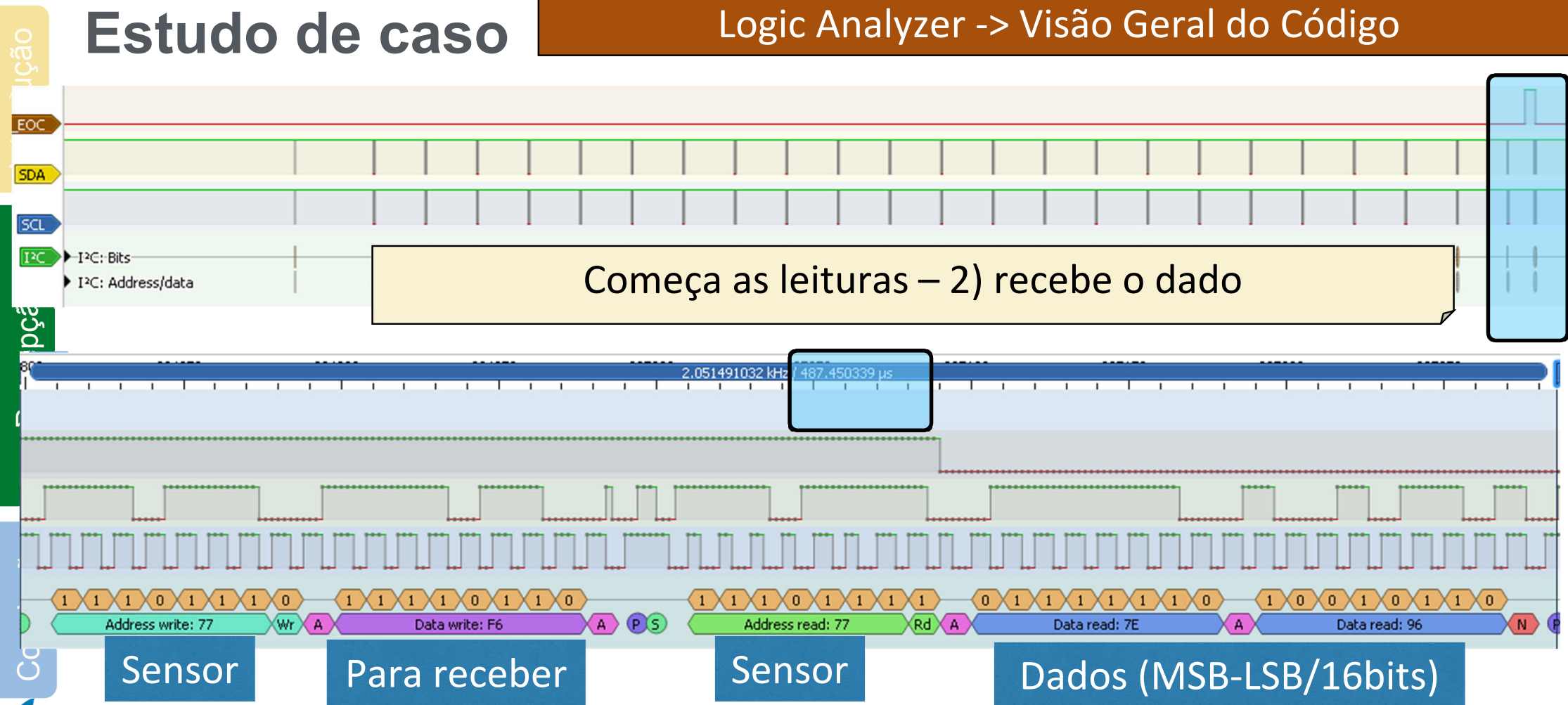
Registrador das medidas

O tipo, temperatura

Características dos Sensores

Estudo de caso

Logic Analyzer -> Visão Geral do Código



Características dos Sensores

Estudo de caso

Características Básicas – Largura de banda

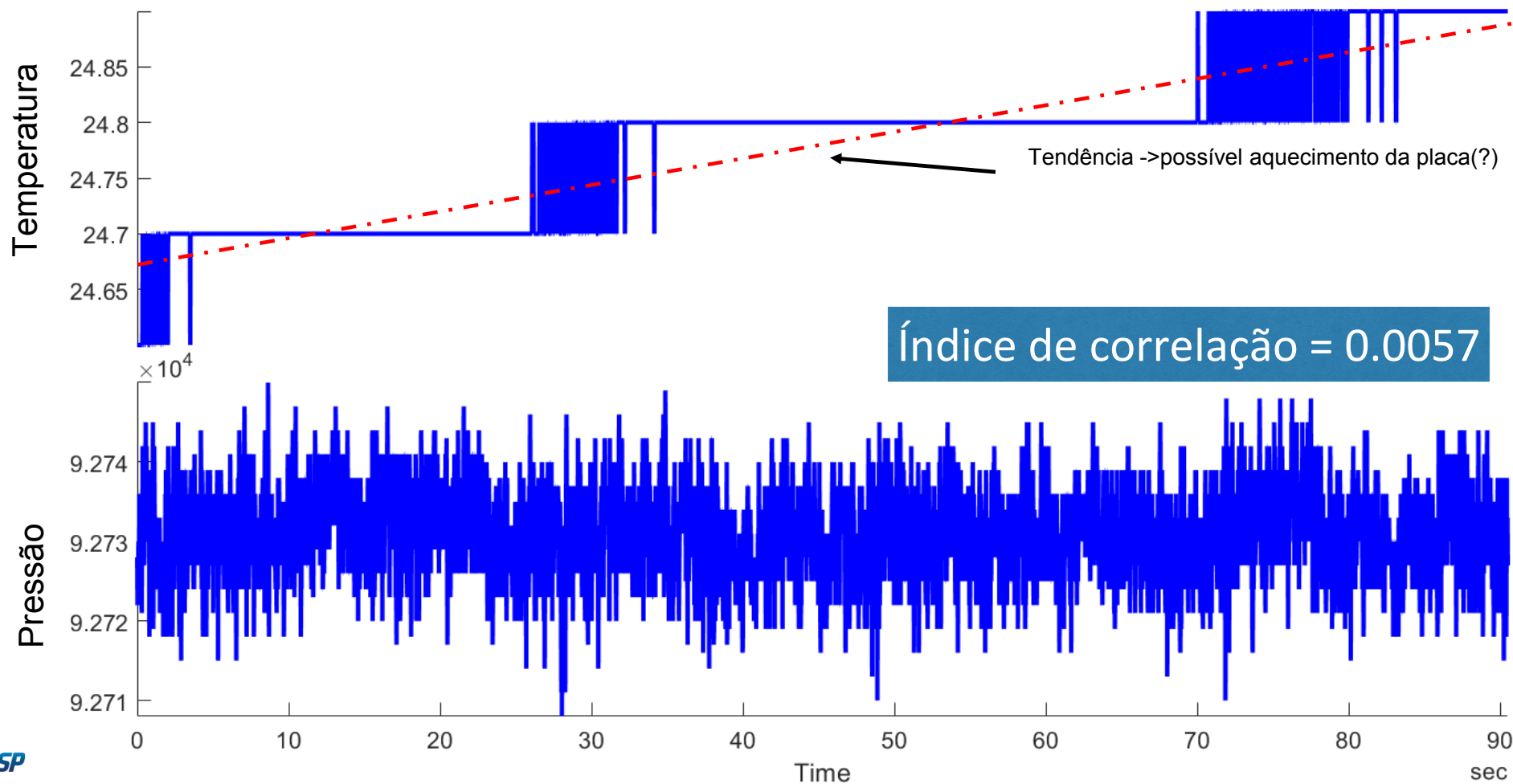
Largura de banda, vai ser o tempo de resposta (o típico para a temperatura é 3 ms + o tempo para receber o dado via I2C – que foi a 100kHz aprox. 0.48 ms. Portanto:

$$f_{BW} = \frac{1000}{3.5} \Rightarrow \approx 286 \text{ Hz}$$

Características dos Sensores

Estudo de caso

Teste Estático

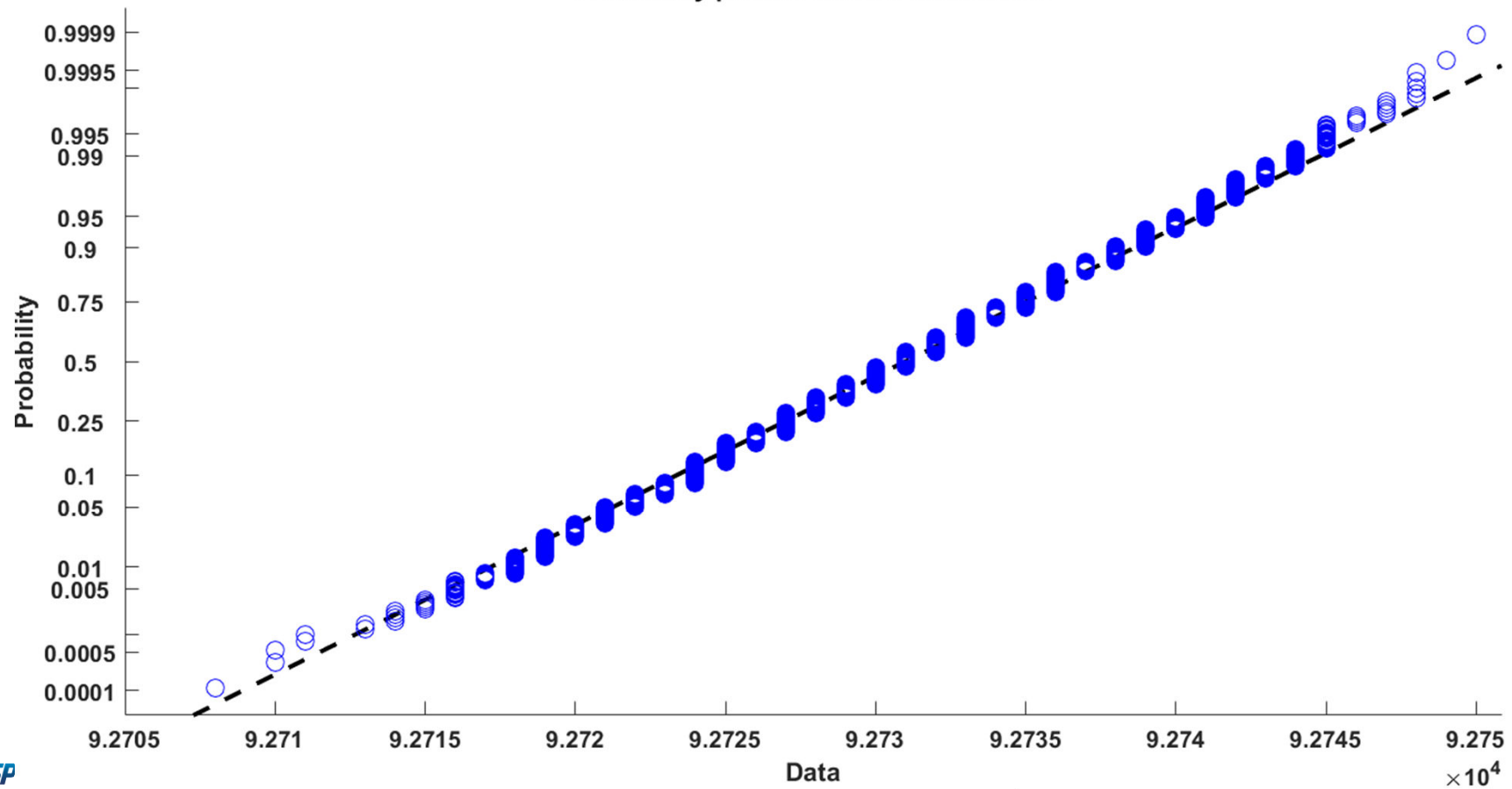


Características dos Sensores

Estudo de caso

Teste Estático

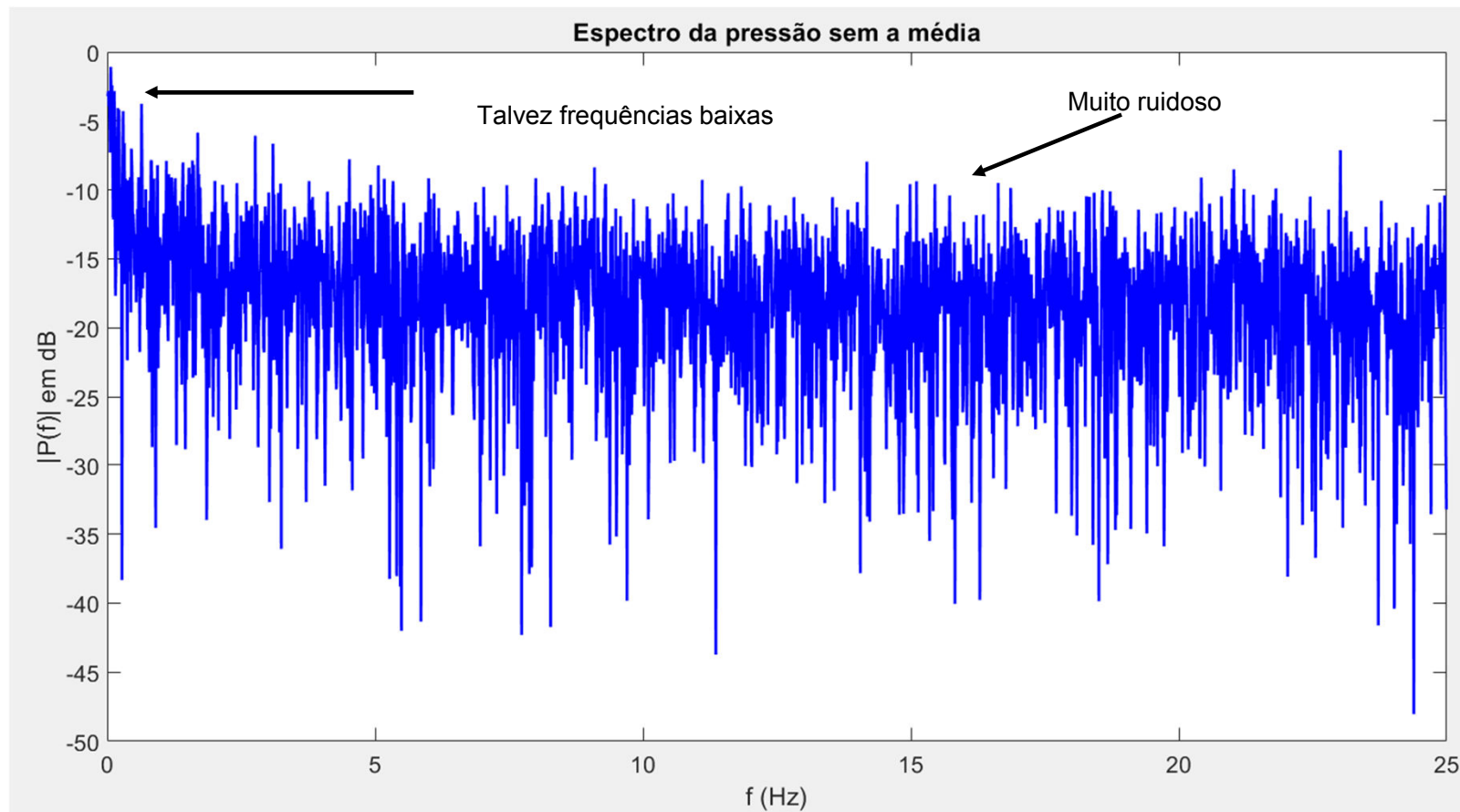
Probability plot for Normal distribution



Características dos Sensores

Estudo de caso

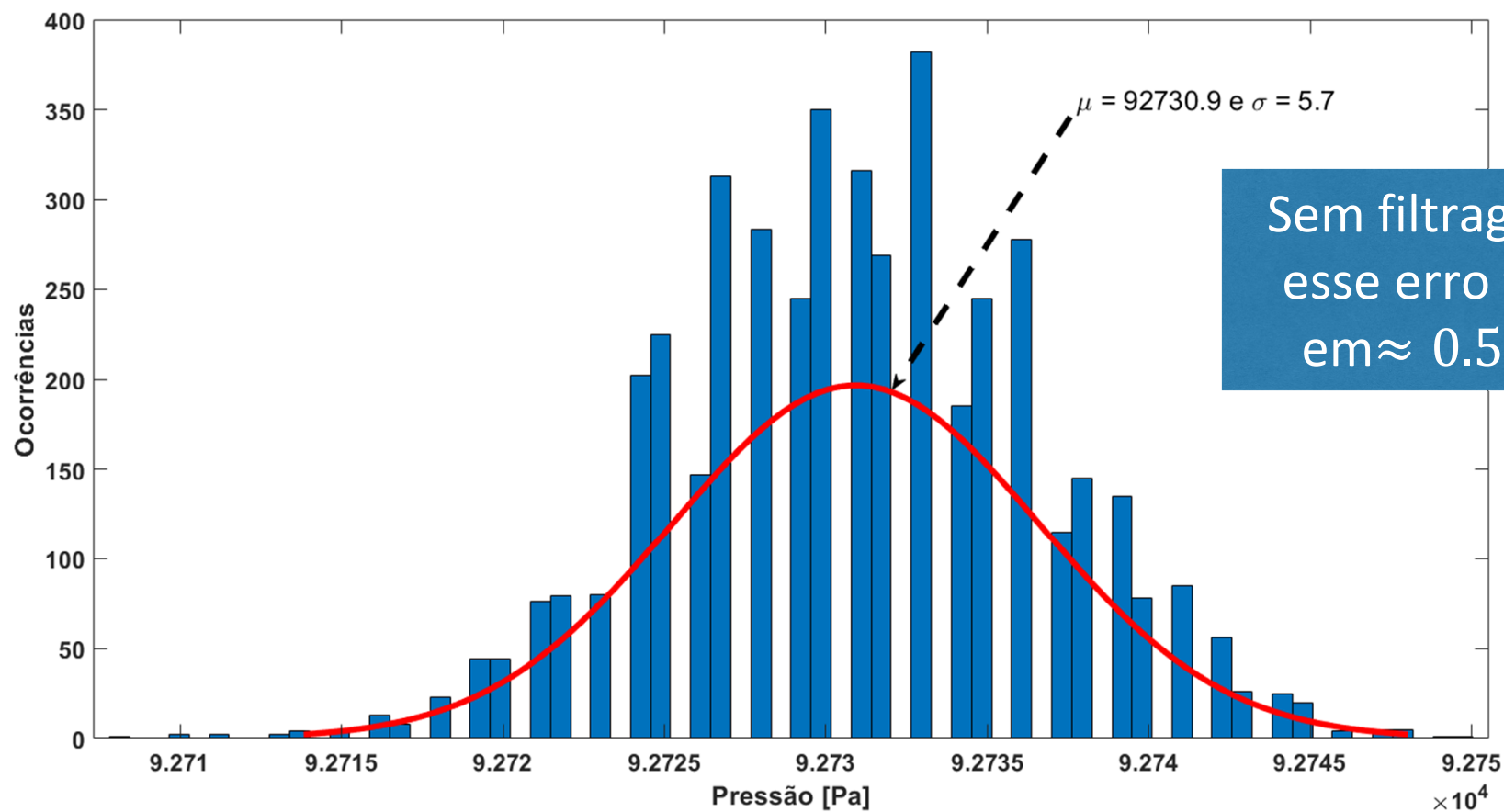
Teste Estático



Características dos Sensores

Estudo de caso

Teste Estático



Introdução

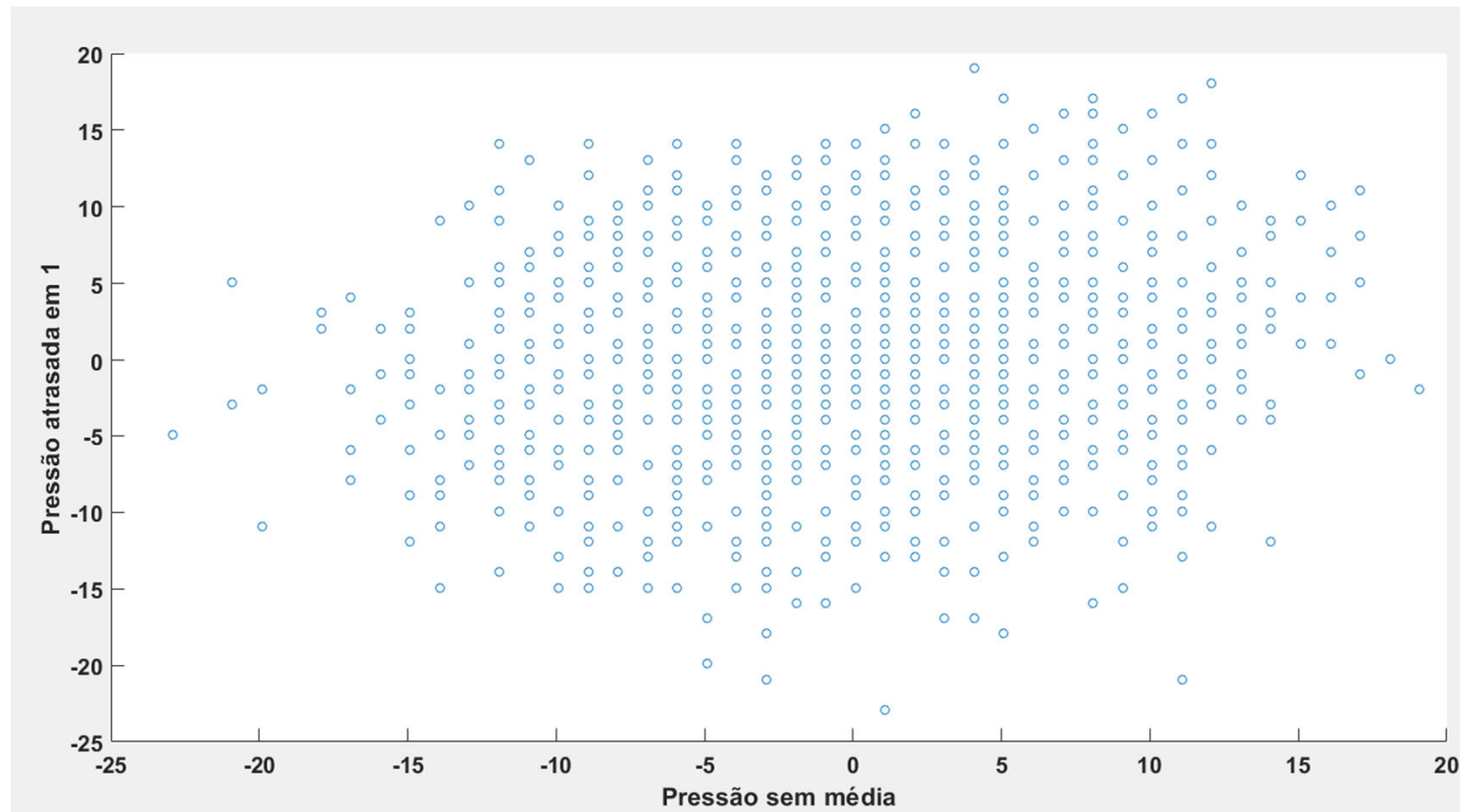
Percepção

Conclusão

Características dos Sensores

Estudo de caso

Teste Estático



Introdução

Percepção

Conclusão

Características dos Sensores

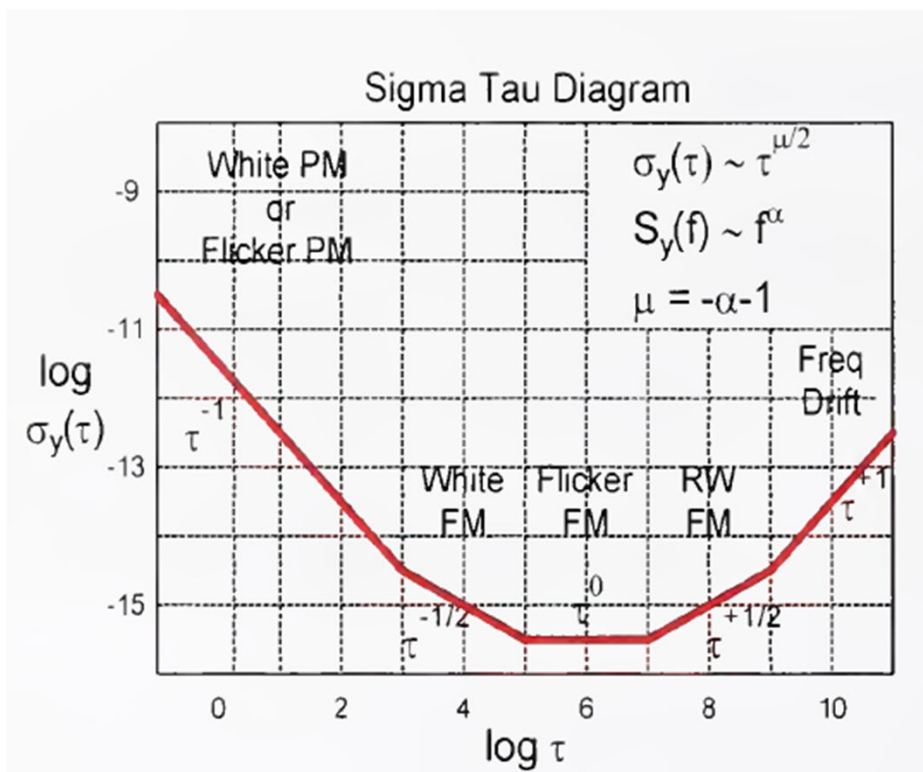
Estudo de caso

Teste Estático – Variância de Allan

Introdução

Percepção

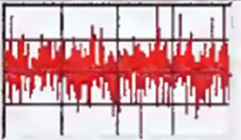
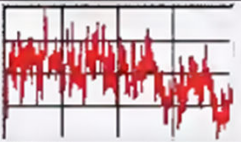
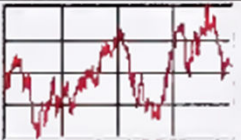
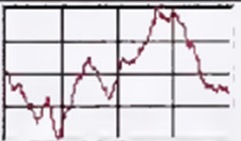
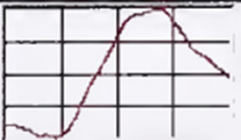
Conclusão



Noise Type	α
White PM (W PM)	2
Flicker PM (F PM)	1
White FM (W FM)	0
Flicker FM (F FM)	-1
Random Walk FM (RW FM)	-2
Flicker Walk FM (FW FM)	-3
Random Run FM (RR FM)	-4

Características dos Sensores

Estudo de caso

Noise Type	α	Phase Data* $x(t)$
W PM	2	
F PM	1	
W FM	0	
F FM	-1	
RW FM	-2	

Teste Estático

Table 10. Lag 1 Autocorrelation for Various Power Law Noises and Differences

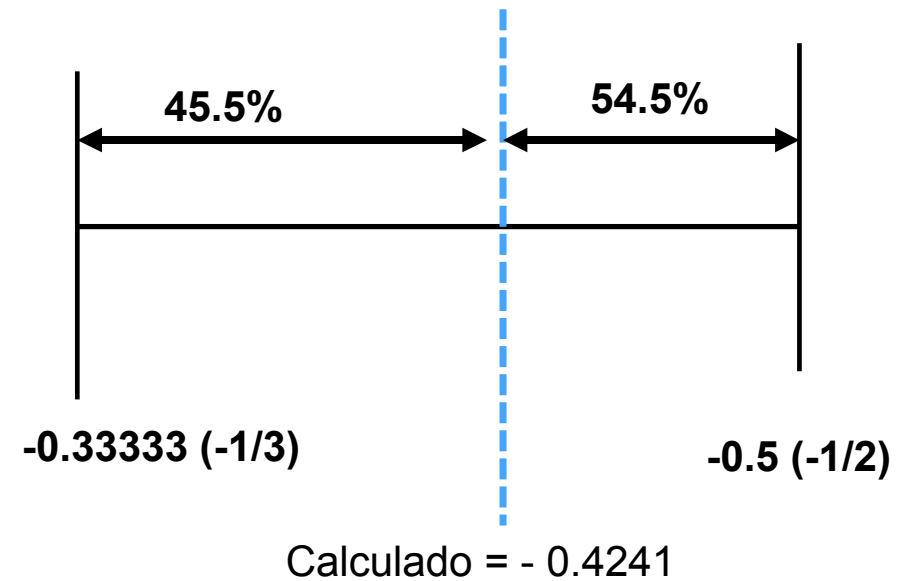
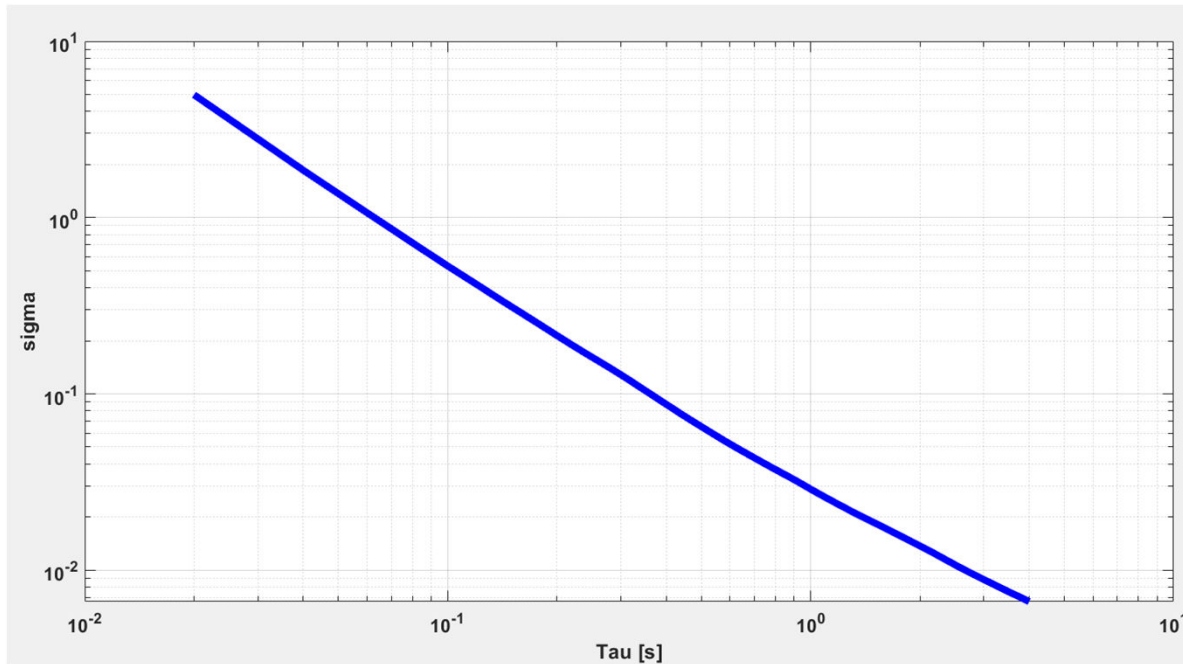
Noise Type α	Lag 1 Autocorrelation, r_1^\dagger					
	d=0		d=1		d=2	
	x(t)	y(t)	x(t)	y(t)	x(t)	y(t)
2	0	-1/2	-1/2	-2/3	-2/3	-3/4
1	≈ 0.7	-1/3	-1/3	-3/5	-3/5	-5/7
0	≈ 1	0	0	-1/2	-1/2	-2/3
-1	≈ 1	≈ 0.7	≈ 0.7	-1/3	-1/3	-3/5
-2	≈ 1	≈ 1	≈ 1	0	0	-1/2

[†] Shaded values are those used for noise ID for the particular noise and data type.

Características dos Sensores

Estudo de caso

Teste Estático



$$\alpha = 1 \Rightarrow \text{FPM}$$

$$\alpha = 2 \Rightarrow \text{WPM}$$

Características dos Sensores

Estudo de caso

Introdução

Percepção

Conclusão

Fim parte 1