

Sistemas Especialistas Aplicados à Engenharia



EAILAB



**Expert Systems in
Artificial Intelligence**



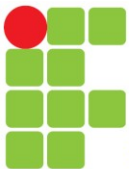
Sistemas Especialistas Aplicados à Engenharia

Ruído – Perturbação – Incerteza - Contradição

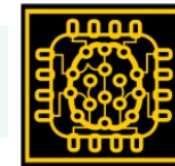


Mini-curriculo do Professor

- Pós-doutorado em Ciências (Sistemas Eletrônicos) pela POLI/USP (2023)
- Doutor em Ciências (Sistemas Eletrônicos) pela POLI/USP (2021)
- Mestre em Engenharia Mecânica pela UNISANTA (2017).
- Tutoria EAD pela FGV (2004) e Docência Nível Superior pela FGV (2002).
- MBA Em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas RJ (2001), com extensão de MBA na Universidade da Califórnia – Campus Irvine (2001).
- Professor Licenciado para ensino de nível segundo grau pelo CEFET – Paraná (1995).
- Engenheiro Eletrônico pela UNISANTA (1991).
- Professor Titular EBT (2022) da IFSP Cubatão desde 1992. Professor da UNISANTOS (2003 - 2015) e FORTEC (1990 - 1992).
- Pesquisador do EAILab e dos grupos de pesquisa Labmax e AutomSystem do IFSP.
- É colaborador e possui tutoriais publicados no Site Teleco (www.teleco.com.br), desde 2011.
- Obteve Certificações Cisco Business Transformation (2015), PMI (2012), Wireless CWNA, Cisco CCNA & CCNP de Router & Switches (2011).
- Inglês e Espanhol fluentes. Noções de Frances.
- Atuou profissionalmente em todo o Brasil, EUA, Inglaterra, França, Romênia, China e toda LATAM.
- Possui cursos de Fibras Óticas, Microcontroladores, Redes Wireless, Cisco (CCNA, QoS, VoIP), Gerenciamento de Projetos, entre outros.
- Atuou em empresas como Medidata, Cisco, Alcatel-Lucent (Nokia), MSI (hoje Menthum), Evadin, TV Tribuna (Afiliada Rede Globo), ocupando cargos Técnicos, de Consultoria e Gerencia.



O que é Ruído?

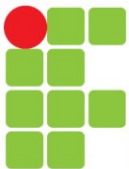


No processamento de sinal, o **ruído** é um termo geral para modificações indesejadas, geralmente desconhecidas, que um sinal pode sofrer durante a captura, armazenamento, transmissão, processamento ou conversão.

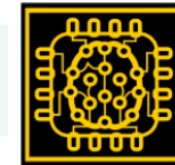
O ruído de processamento de sinal (*signal processing noise*) pode ser classificado por suas propriedades estatísticas, também chamadas de “cor” do ruído, e como ele modifica o sinal pretendido.

Exemplos:

- Ruído Branco (*white noise*)
- Ruído Rosa
- Ruído Marrom
- Ruído Preto
- Ruído Poisson
- Burst
- Transiente
- Ruído de Sal e Pimenta (*salt and pepper*)



Cores de Ruído



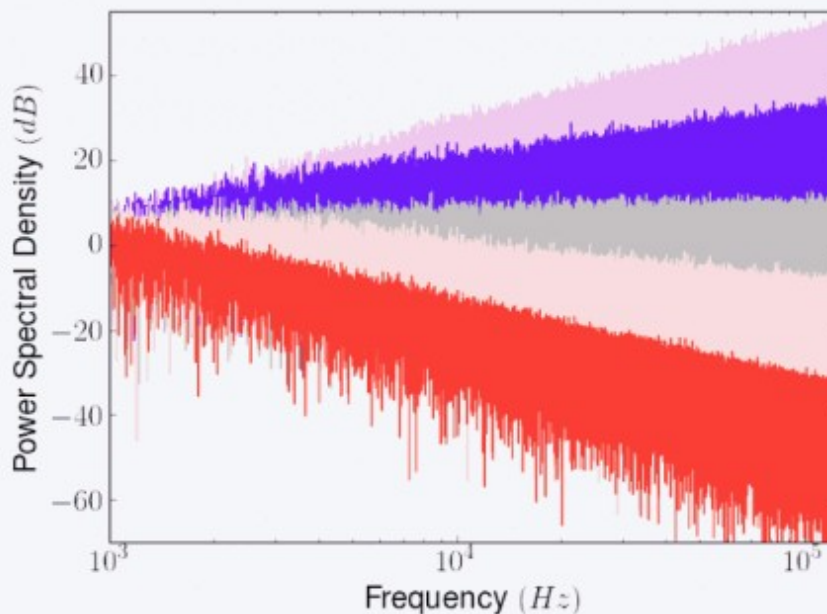
WHITE

equal power at all
frequencies

tv static, fan

helps with tinnitus and sleep

The color of noise is the power
spectrum of the noise signal.



BLUE

power increases as
frequency increases

hissing garden hose

useful for dithering

PINK

linear power on a
logarithmic scale

rain, wind, heartbeat

aids relaxation and sleep

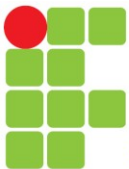
BROWN

power decreases as
frequency increases

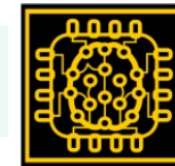
distant thunder

aids focus

<https://sciencenotes.org/colors-of-noise-white-pink-brown-and-more/>



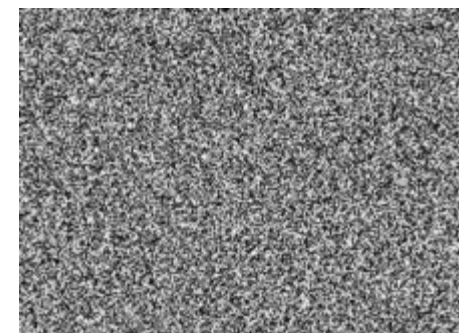
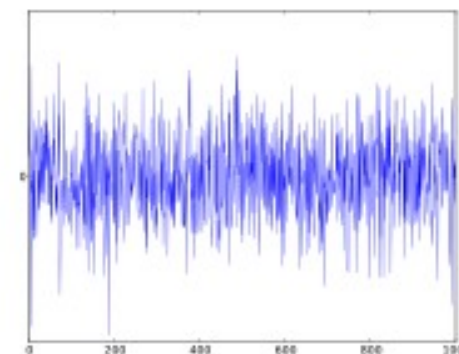
Tipos de Ruído



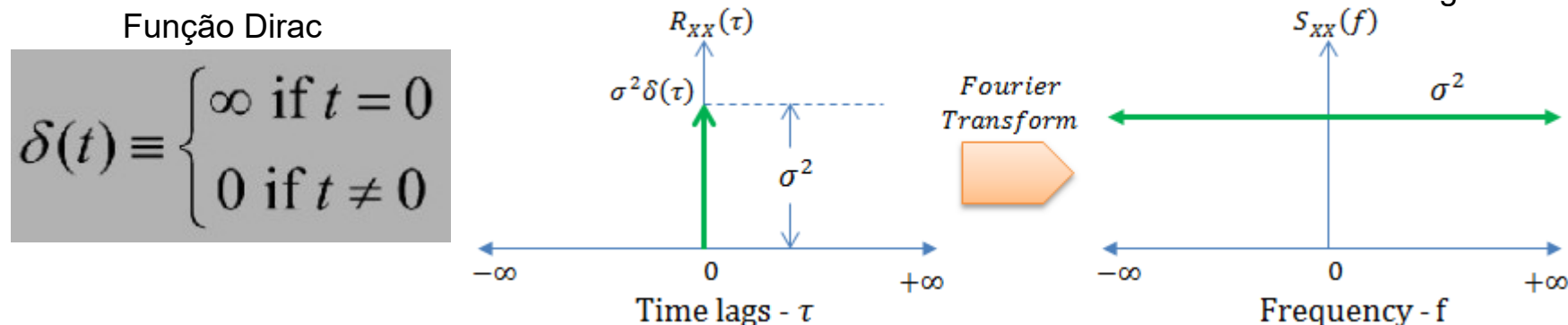
Ruído Branco (ou gaussiano) é um é um sinal aleatório com intensidade igual em diferentes frequências (“todas”), resultando em uma função de densidade espectral de potência (power spectral density function - PSD) constante.

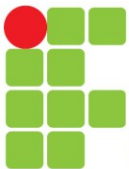
Assim sendo, o ruído branco possui potência infinita!

Em tempo discreto, o ruído branco é um sinal discreto cujas amostras são consideradas uma sequência de variáveis aleatórias não correlacionadas em série com **média zero** e **variação finita**.

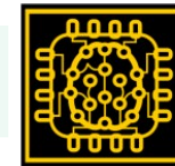


Uma imagem de "ruído branco"



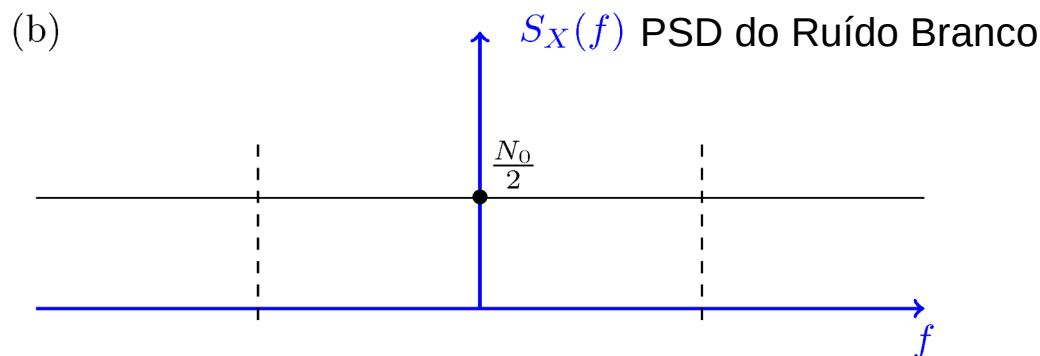
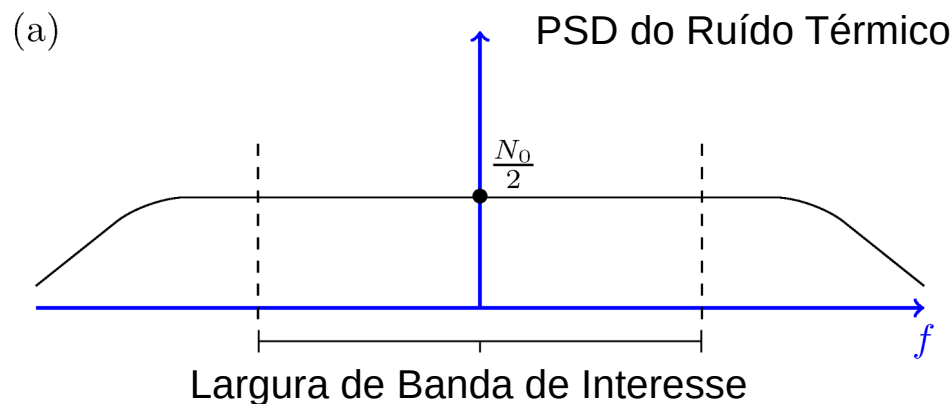


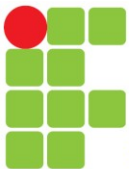
Tipos de Ruído



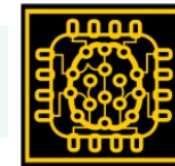
O **ruído branco** é muito utilizado para modelar o **ruído térmico** (*thermal noise*) em sistemas eletrônicos.

Ruído Térmico é semelhante ao ruído branco, porém limitado à largura de banda (Δf) de interesse.



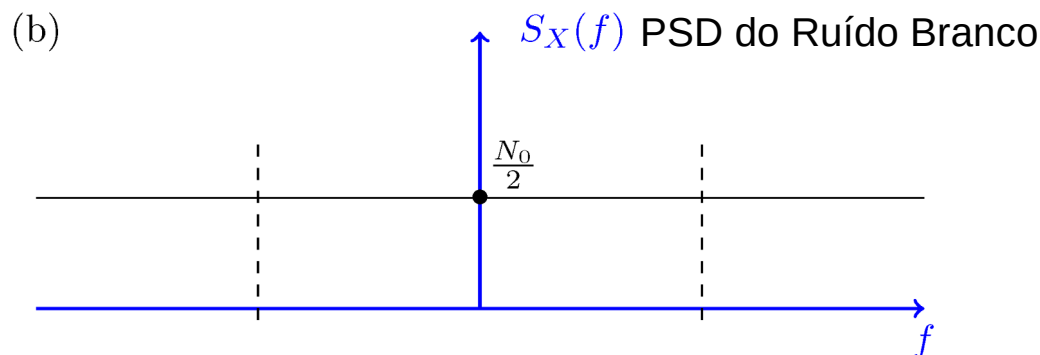
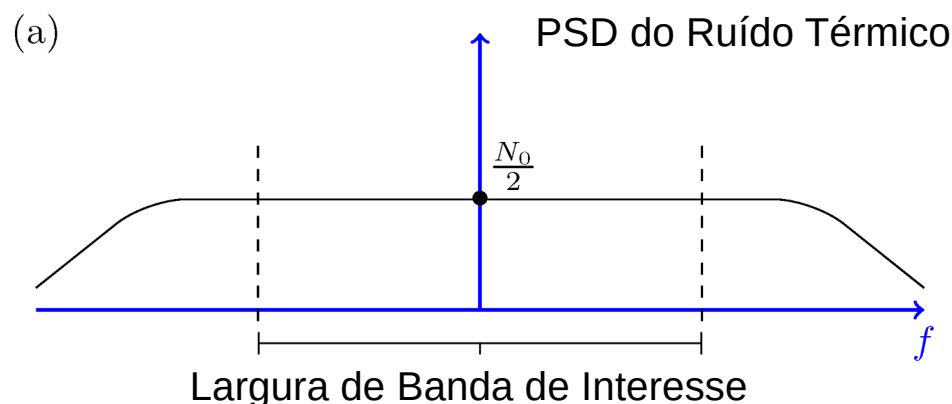


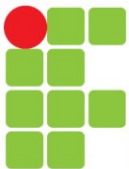
Tipos de Ruído



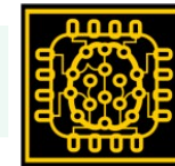
O **ruído branco** é muito utilizado para modelar o **ruído térmico** (*thermal noise*) em sistemas eletrônicos.

Ruído Térmico é semelhante ao ruído branco, porém limitado à largura de banda (Δf) de interesse.

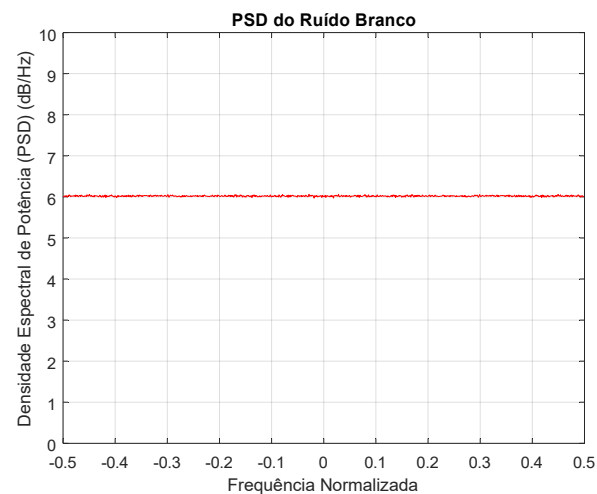
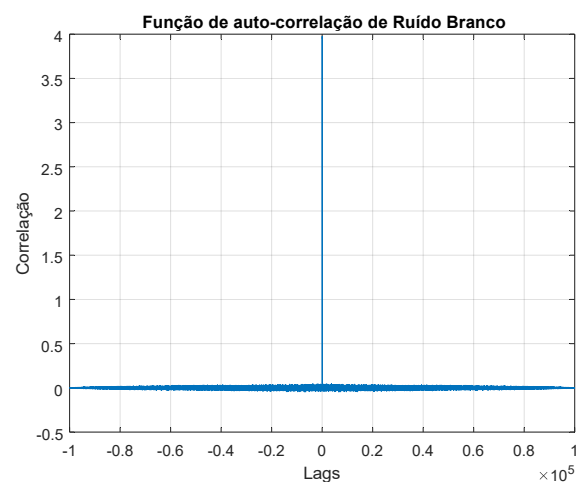
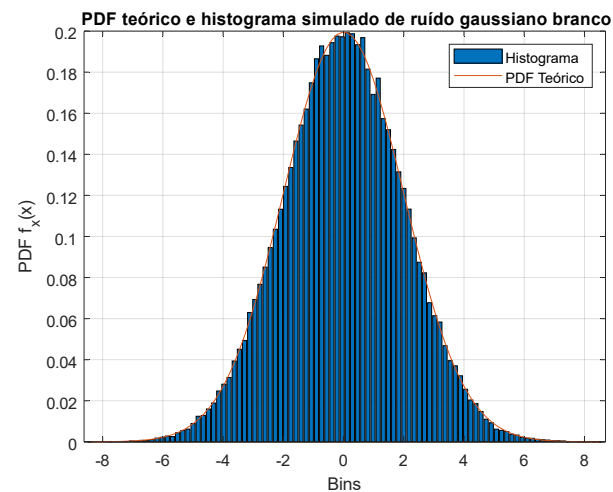
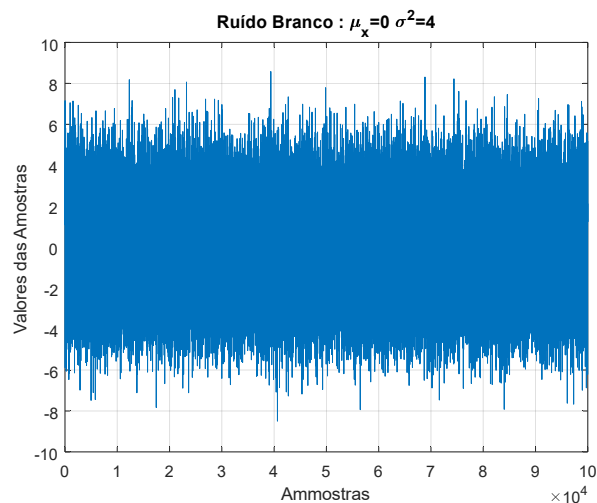


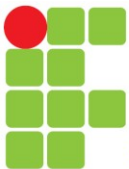


Tipos de Ruído

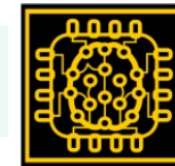


Exemplo no Matlab





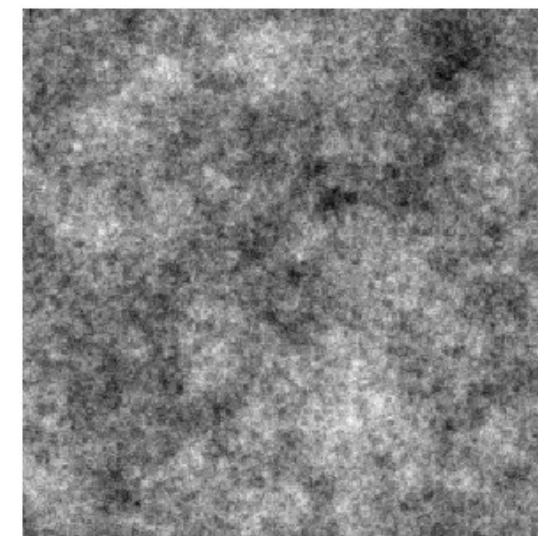
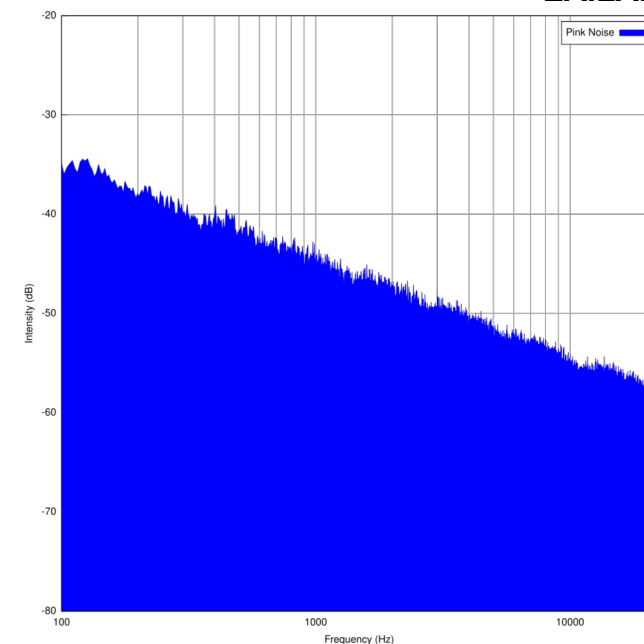
Tipos de Ruído

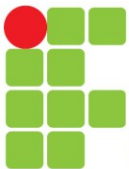


EAILAB

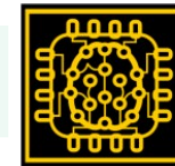
O **ruído rosa** é um sinal ou processo com um espectro de frequência, de modo que a PSD seja inversamente proporcional à frequência do sinal. No ruído rosa cada intervalo de oitava ($1/4$ da frequência) carrega uma quantidade igual de energia de ruído.

O ruído rosa pode ser gerado por computador gerando primeiro um sinal de ruído branco, aplicando-se a FFT e depois dividindo as amplitudes dos diferentes componentes de frequência (f) pela raiz quadrada da frequência (1D) ou pela frequência (2D).





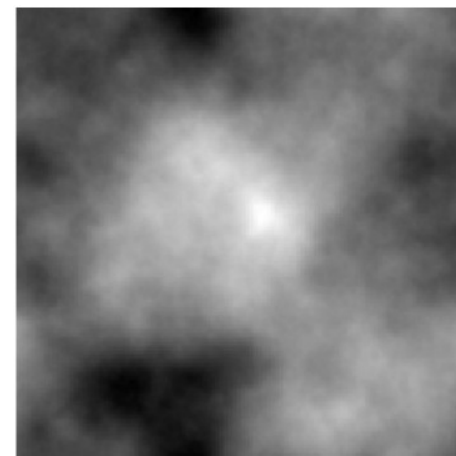
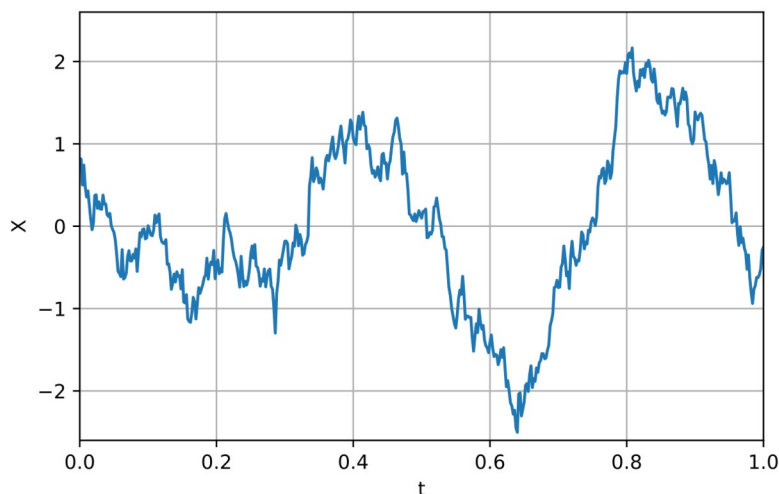
Tipos de Ruído

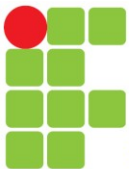


O **ruído marrom** (*brown noise*) é o tipo de ruído de sinal produzido pelo movimento browniano.

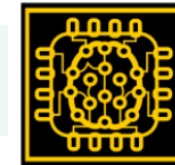
O termo "ruído marrom" não vem da cor, mas depois de Robert Brown, que documentou o movimento irregular para vários tipos de partículas inanimadas na água.

O ruído marrom pode ser produzido integrando o ruído branco, ou seja, ele pode ser produzido adicionando um deslocamento aleatório a cada amostra para se obter o próximo



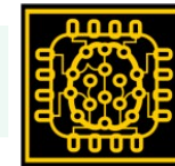
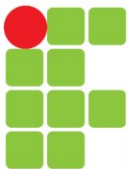


Tipos de Ruído



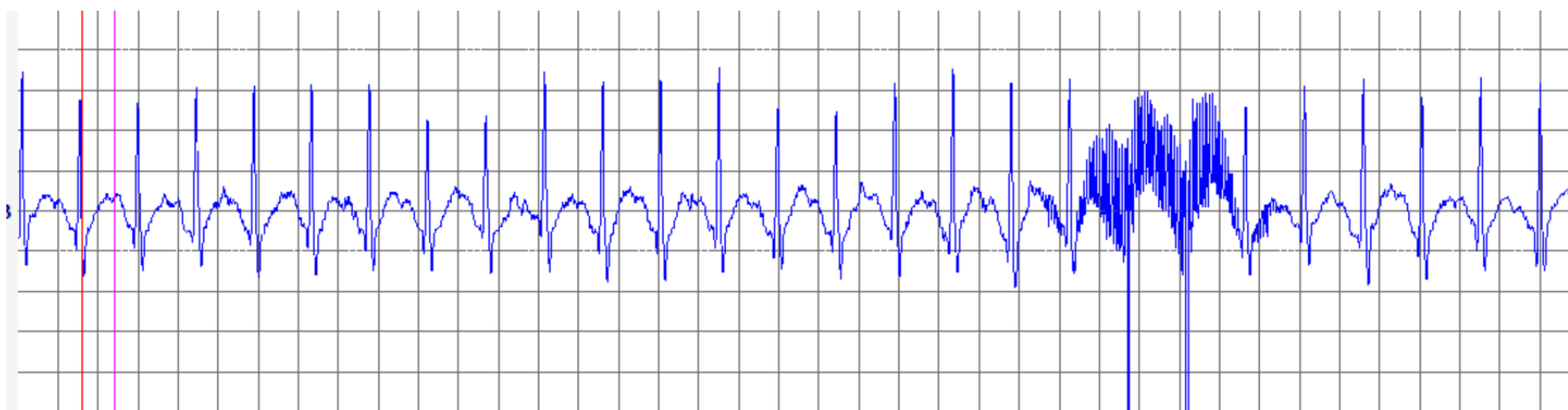
As definições para o **ruído preto** variam desde a completa ausência de som até o ruído apenas em baixas frequências:

- É o silêncio.
- O ruído preto é infra-cravadoso ou abaixo do alcance da audição humana.
- É ruído com um espectro $1/F^\beta$, onde $\beta > 2$.
- É a falta de ruído, exceto por alguns picos aleatórios de ruído branco.
- O ruído preto é o espectro da radiação do corpo negro ou ruído térmico. Nesse caso, é o ruído acima do limite da audição humana.

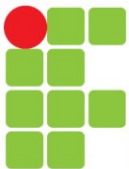


Ruído Intermitente: é um ruído variável, uma mistura de períodos aleatórios de oscilações intensas e repouso.

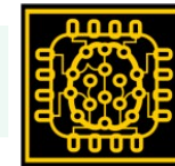
Devido à natureza aleatória, a sua detecção e análise requerem longos períodos de observação.



<https://e2e.ti.com/support/data-converters-group/data-converters/f/data-converters-forum/430007/ads1298---intermittent-noise>



Tipos de Ruído

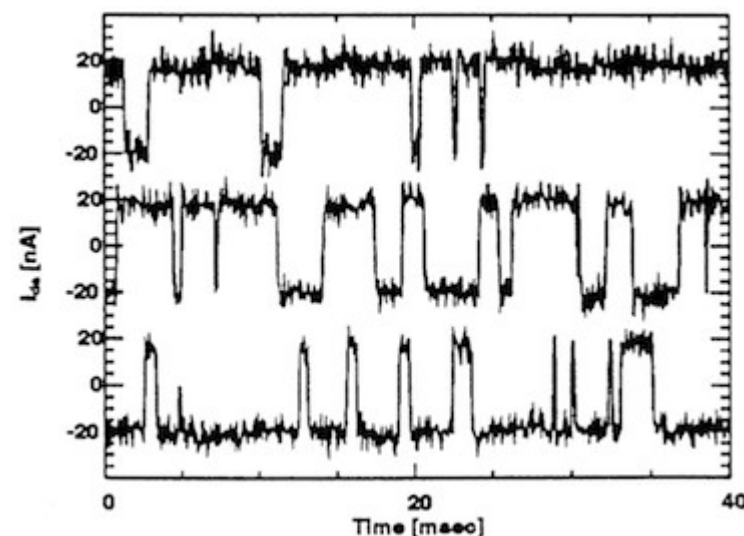
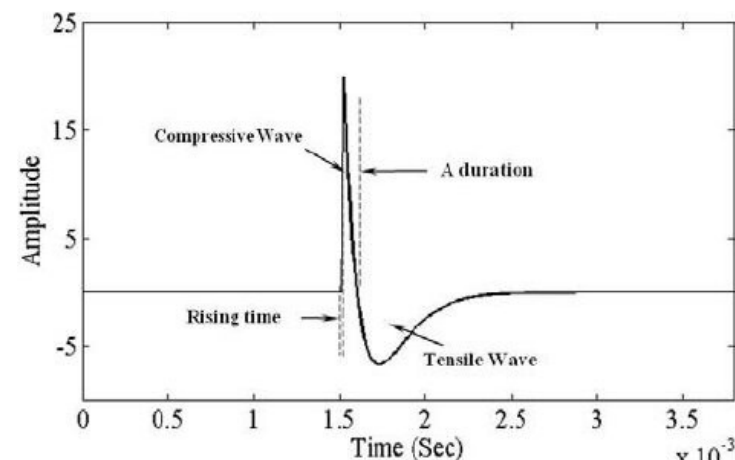


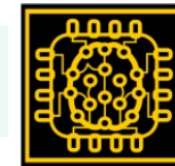
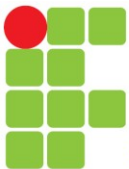
EAILAB

Ruído Impulsivo Transitório (transient): consiste em pulso relativamente curto, seguido de oscilações em decomposição de baixa frequência. O pico inicial geralmente se deve a uma interferência de impulso, e as seguintes oscilações são devidas a ressonância no canal que recebeu o pulso inicial. Em ambiente industrial pode ser gerado por acionamentos e comutações. Motores DC de escovas geram sequências de impulsos.

<https://labprojectsbd.com/2022/04/05/how-to-reduce-noise-from-dc-motor/>

Ruído de Rajada (Burst): Ocorre em semicondutores. Consiste em transições repentinas semelhantes a dois ou mais níveis de tensão ou corrente discretos, em tempos aleatórios e imprevisíveis. Cada mudança na tensão ou corrente de deslocamento geralmente dura de vários milissegundos para segundos e soa como pipoca se for conectada a um alto-falante de áudio.



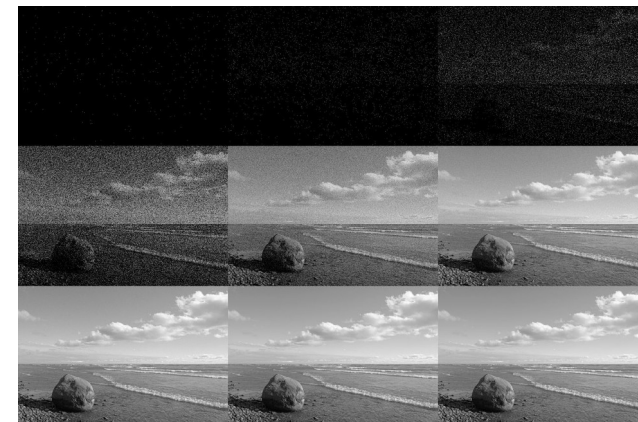


Ruído de Poisson:

Ou **ruído de tiro (*shot*)**, é um tipo de ruído que pode ser modelado por um processo de Poisson.

Em eletrônica, o ruído de tiro se origina da natureza discreta da carga elétrica.

O ruído de tiro também ocorre na contagem de fótons em dispositivos ópticos, onde o ruído de tiro está associado à natureza das partículas da luz.

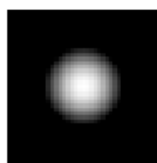


Simulação de ruído de fótons. O número de fótons por pixel aumenta da esquerda para a direita e da linha superior para a linha inferior.

O ruído de tiro nos circuitos eletrônicos consiste em flutuações aleatórias da corrente CC, devido à corrente elétrica ser um fluxo de cargas discretas (elétrons).

O ruído de tiro é uma flutuação que afeta todas as medições de intensidade da luz, incluindo imagens microscópicas gravadas com uma câmera CCD.

SNR = 1000



SNR = 100



SNR = 10

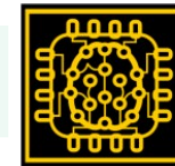
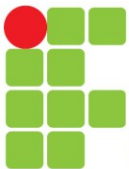


SNR = 3.1623



SNR = 1





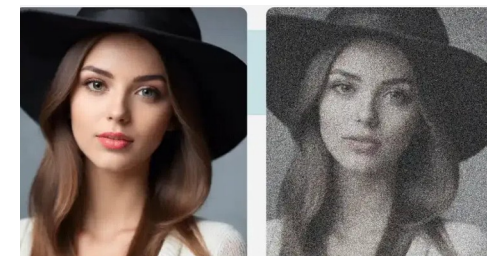
Ruído de Sal e Pimenta (salt-and-pepper):

O ruído de sal e pimenta, também conhecido como **ruído de impulso**, é uma forma de ruído às vezes vista nas imagens digitais.

Para imagens em preto e branco ou em escala de cinza, são presentes como pixels brancos e pretos que ocorrem escassamente, dando a aparência de uma imagem polvilhada com sal e pimenta.

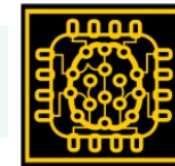
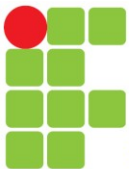
O ruído de sal e pimenta pode ser causado por distúrbios nítidos e repentinos no sinal da imagem. Estes podem ser de erros de transmissão, elementos de pixels corrompidos nos sensores da câmera ou locais de memória com defeito no mídia de armazenamento.

Um método eficaz de redução desse tipo de ruído é um filtro de média.



<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8291474>

<https://www.geeksforgeeks.org/impulse-noise/>



Termo usado em diversas áreas como filosófica, estatística e física.

Em economia, o **risco** designa uma situação em que as possibilidades do futuro são conhecidas, enquanto que a **incerteza** se refere a uma situação em que não se conhecem essas possibilidades.

Segundo a definição da União Europeia (Diretiva Comunitária 2007/589/CE)

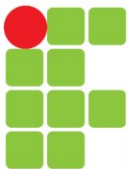
A incerteza é definida como o parâmetro associado ao resultado da determinação de uma quantidade, que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos a essa determinada quantidade (incluindo os efeitos de fatores sistemáticos e aleatórios), expresso em **percentagem** e que descreve um **intervalo de confiança** próximo do **valor médio**, compreendendo 95% dos valores inferidos.

Incerteza de medidas refere-se à dificuldade de prever eventos futuros em razão de eventuais erros em medidas físicas já realizadas.

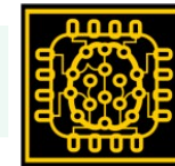
Na inteligência artificial (AI)

A incerteza refere-se à incapacidade de modelos de fazer **previsões** totalmente confiáveis devido a dados incompletos, ambíguos ou ruidosos.

Os sistemas de IA devem explicar a incerteza para tomar decisões precisas e confiáveis, especialmente em ambientes dinâmicos onde as informações são inconsistentes ou evoluindo.



Contradição



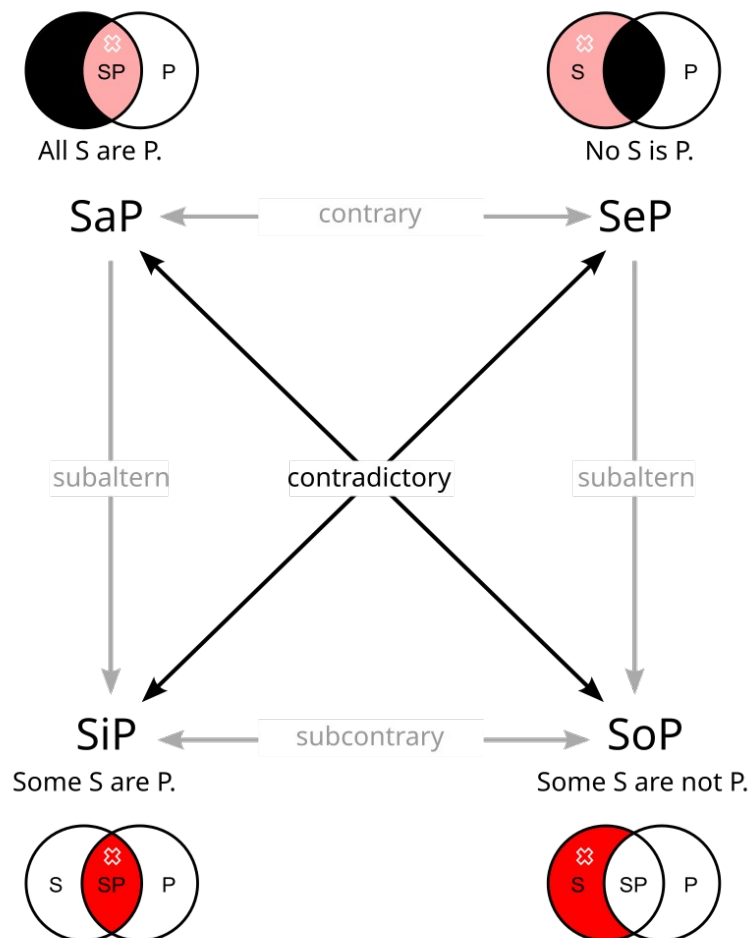
Uma contradição é uma situação em que duas afirmações ou ideias são incompatíveis entre si, ou seja, não podem ser verdadeiras ao mesmo tempo.

É um conceito amplamente utilizado em lógica e filosofia para identificar **inconsistências** e **falhas** em argumentos ou teorias.

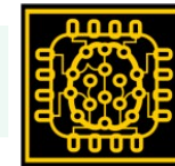
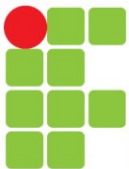
Na lógica tradicional, uma contradição ocorre quando uma proposição entra em conflito consigo mesma ou com um fato estabelecido.

É frequentemente usada como uma **ferramenta** para **detectar** crenças e preconceitos dissimulados.

Em engenharia pode ocorrer na forma de inconsistência entre medições, falhas de sensores, ausência temporária de informação (dropout), etc.



Este diagrama mostra as relações contraditórias entre proposições categóricas no quadrado de oposição da lógica aristotélica.

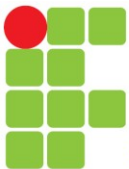


Em estatística e otimização de sistemas, **erros** e **resíduos** são duas medidas intimamente relacionadas e facilmente confundidas do desvio de um valor observado de um elemento de uma amostra estatística de seu "valor verdadeiro" (não necessariamente observável).

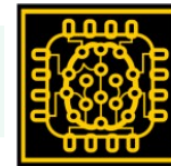
- O erro de uma observação é o desvio do valor observado do valor verdadeiro de uma quantidade de interesse (por exemplo, uma média populacional).
- O resíduo é a diferença entre o valor observado e o valor estimado da quantidade de interesse (por exemplo, uma média de amostra).

A distinção é mais importante na **análise de regressão**, onde os conceitos às vezes são chamados de erros de regressão e resíduos de regressão e onde levam ao conceito de resíduos estudantilizados.

Erros também são chamados de **perturbações (disturbance)**.

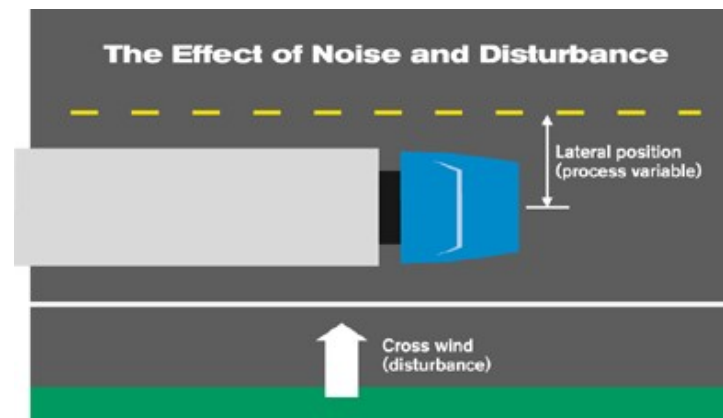


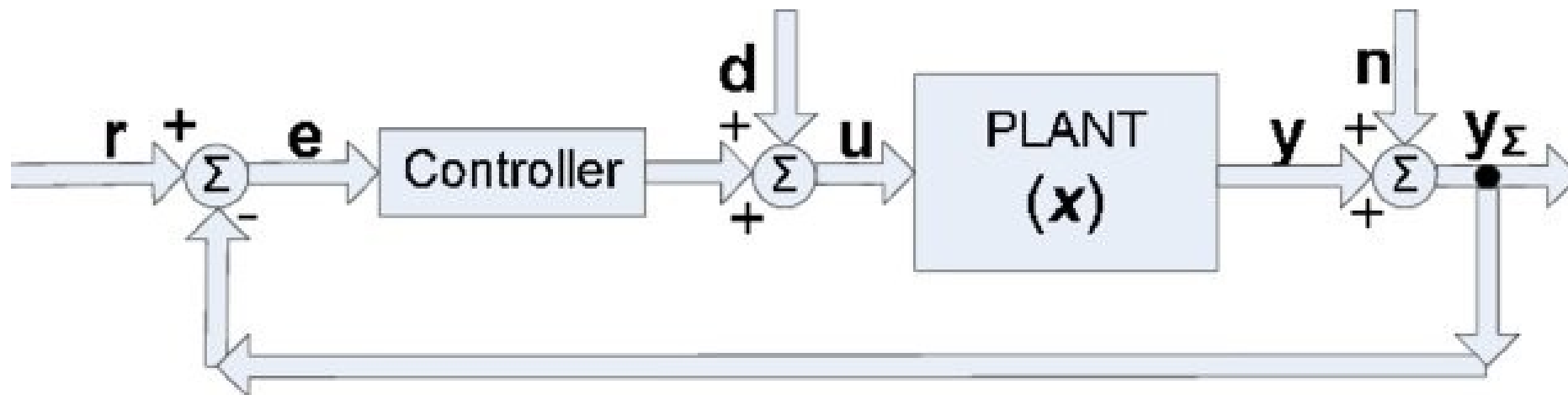
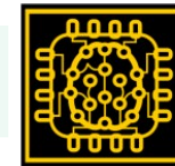
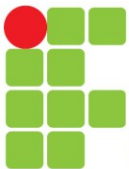
Ruído \neq Perturbação



Exemplo:

- Considere um caminhão grande sendo conduzido pela rodovia através de um vento cruzado.
- O cérebro do motorista é o controlador e seus olhos são os sensores que medem a posição do caminhão. Com base no que ele vê, o motorista usa seu volante para manter a posição lateral do caminhão entre as faixas da rodovia.
- Se o vento for leve e a visibilidade for boa, o motorista só precisa se preocupar com atualizações na posição desejada do caminhão, exigidas pelas curvas da estrada. Tais mudanças de ponto de ajuste são relativamente fáceis para ele fazer, assumindo que ele sabe como o caminhão reagirá quando ele girar o volante.
- Entretanto, um vento forte pode tirar o caminhão do percurso que o motorista optou por seguir. Para compensar tais **perturbações**, o condutor deve ajustar a sua direção para corrigir os seus erros de posição. Pior ainda, se a velocidade ou a direção do vento mudarem aleatoriamente, os esforços corretivos do motorista terão que ser mais frequentes e mais dramáticos.
- Agora suponha que as faixas na pista estão apagadas ou borradas pela chuva. O motorista pode não ser capaz de ver as linhas brancas muito bem, então ele pode acabar mudando seu curso para compensar um erro de posição inexistente. A chuva nesse caso representa o **ruído**.





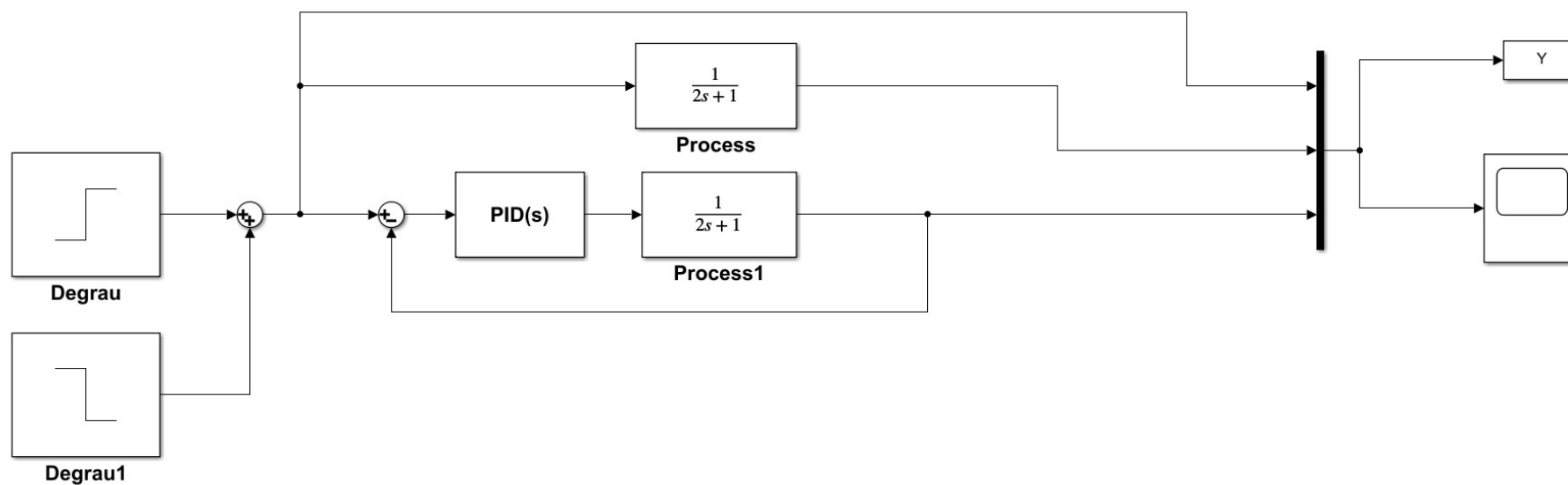
Influências incontroláveis em controle de processos são conhecidas como **perturbações**.

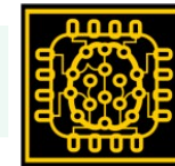
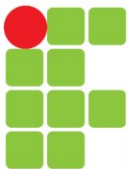
Ruído, por outro lado, faz com que a variável do processo pareça **desviar-se** do ponto de ajuste, esteja qualquer perturbação real em ação ou não.

O ruído geralmente é resultado da tecnologia usada para detectar ou medir a variável do processo.

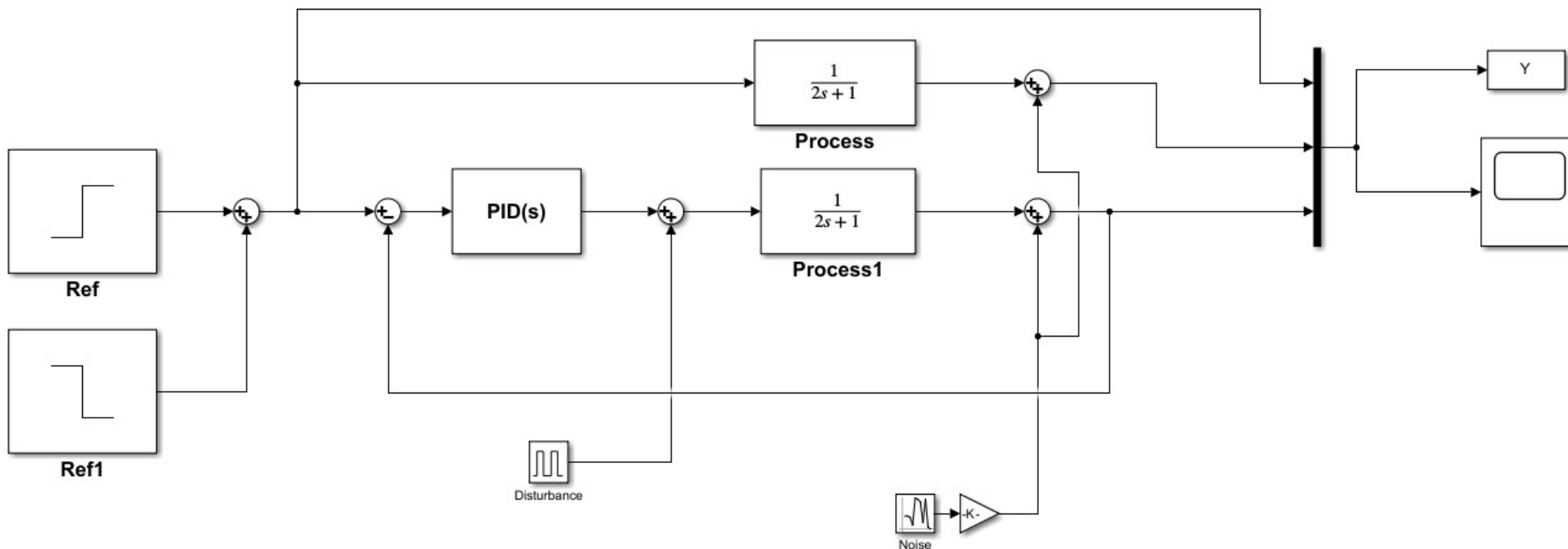
Com sinais elétricos, o ruído de medição é frequentemente devido à interferência de outras fontes elétricas. O ruído também pode ser causado por desgaste no sensor ou alguma obstrução física que faz com que o sensor envie uma leitura imprecisa para o controlador.

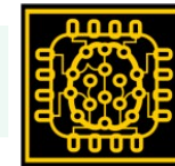
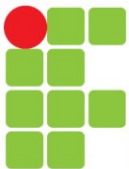
<https://www.controleng.com/noise-and-disturbances-in-process-control/>



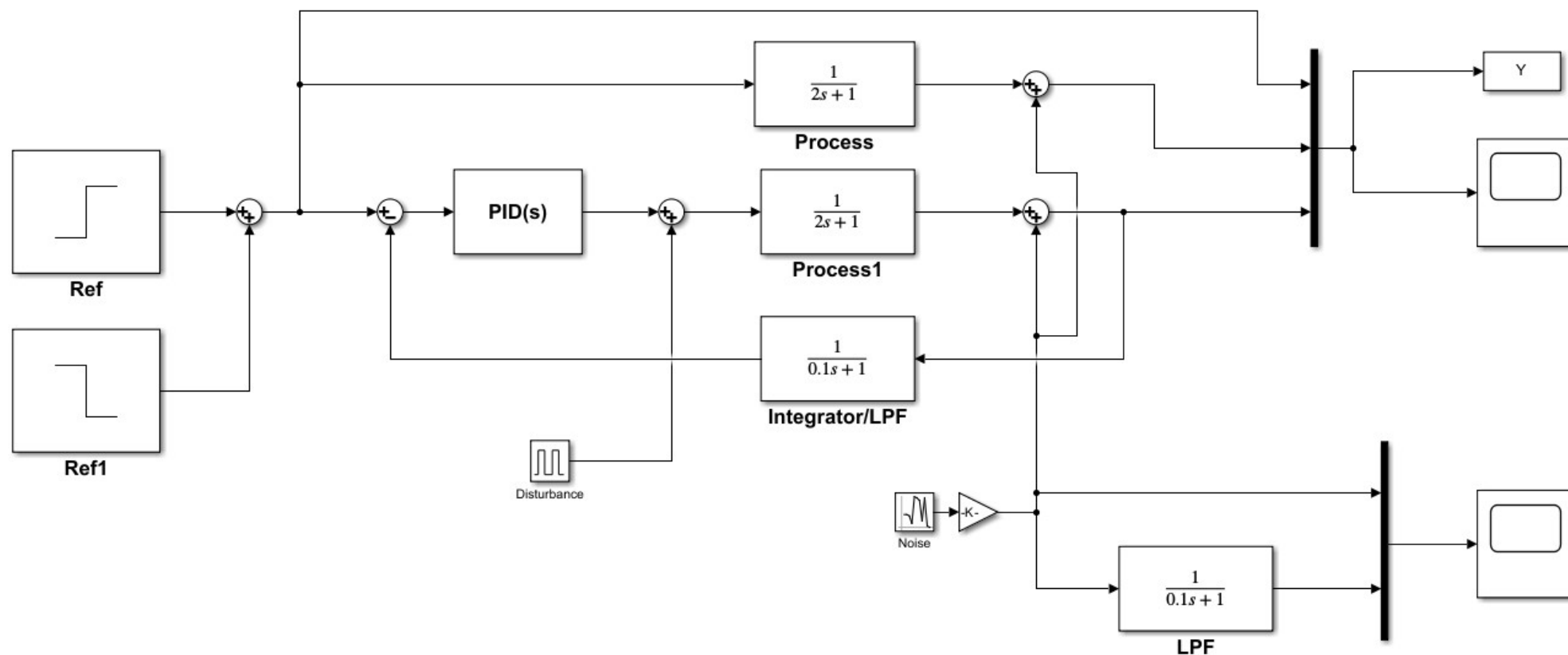


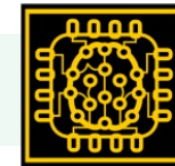
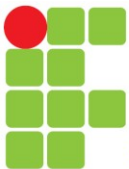
Exemplos no Matlab





Exemplos no Matlab





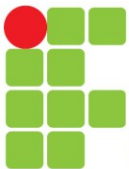
Perturbações e **incertezas** existem amplamente em todos os sistemas industriais e trazem efeitos adversos no desempenho e até **estabilidade** dos sistemas de controle.

Perturbações e rejeição de incerteza são um objetivo essencial em design do sistema de controle.

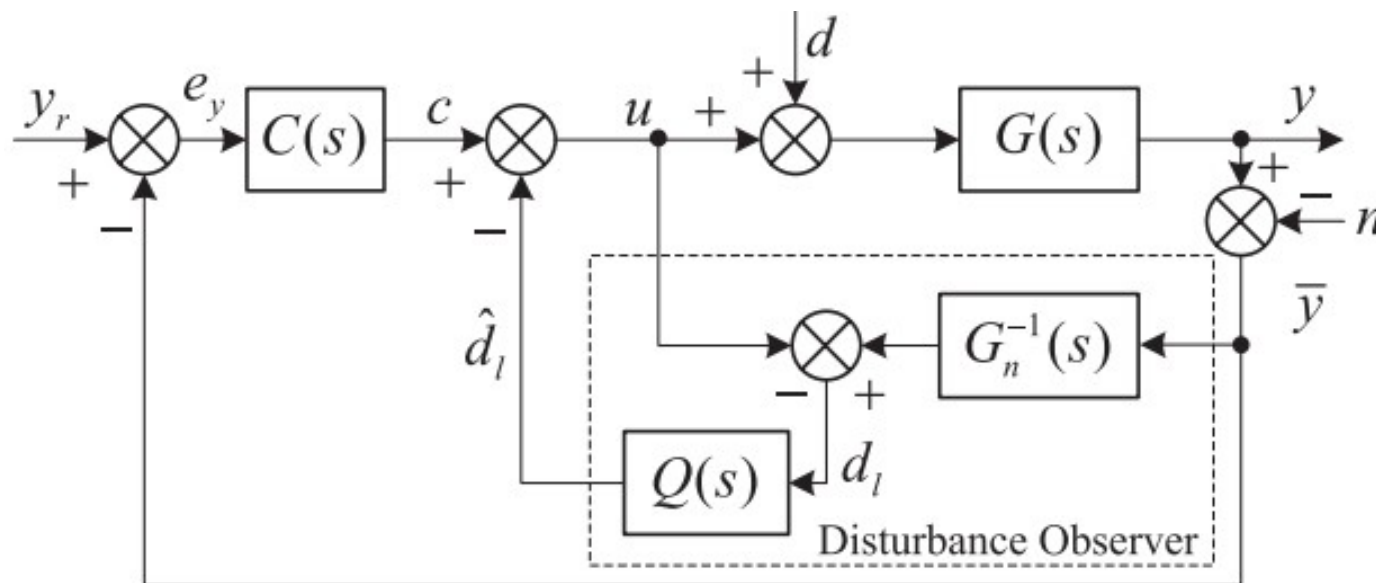
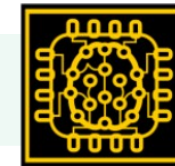
Perturbações não apenas se referem ao do ambiente externo de um sistema de controle, mas também às incertezas do sistema controlado, incluindo dinâmica não modelada e perturbações de parâmetros.

Quando uma perturbação é mensurável, é sabido que uma estratégia de *feedforward* pode atenuar ou eliminar a influência da perturbação.

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7265050>



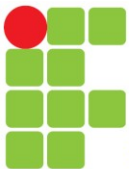
Ruído e Perturbação em Sistemas de Controle



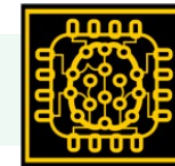
$G(s)$ representa a planta física real,
 $G_n(s)$ é o modelo nominal usado para o design do controlador,
 $Q(s)$ é um filtro estável,
 c é a saída do controlador de feedback,
 u é a entrada de controle,
 y é a saída do sistema,

y_r é o sinal de referência,
 \bar{y} é a saída medida,
 n é o ruído de medição,
 d é a perturbação externa,
 d_l é a perturbação agrupada,
 \hat{d}_l é a estimativa da perturbação irregular.

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7265050>

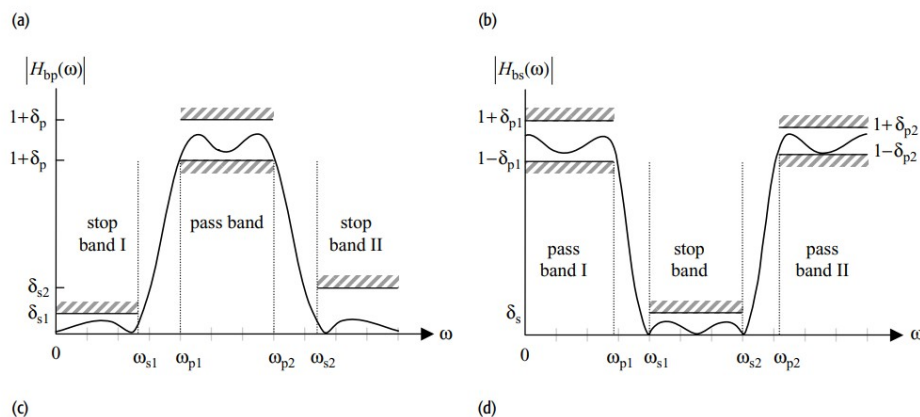
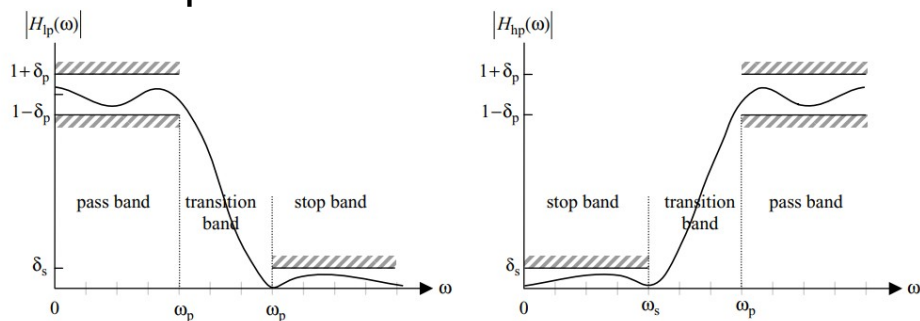


Filtros Contínuos no Tempo



Em processamento de sinais, especialmente na teoria de controle, a estabilidade da entrada limitada, a saída limitada (*bounded-input, bounded-output* - BIBO) é uma forma de estabilidade para sinais e sistemas que recebem entradas.

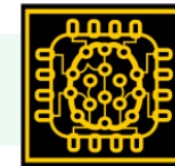
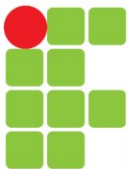
Se um sistema for estável bibo, a saída será delimitada para todas as entradas para o sistema que é delimitado.



$$H(s) = \frac{b_0 s^M + b_1 s^{M-1} + \dots + b_M}{s^N + a_1 s^{N-1} + \dots + a_N}$$

BIBO estável se $M \leq N$ e todos os polos estejam no plano esquerdo (*left hand plane* - LHP)

<https://la.mathworks.com/help/control/ref/dynamicsystem.pole.html>



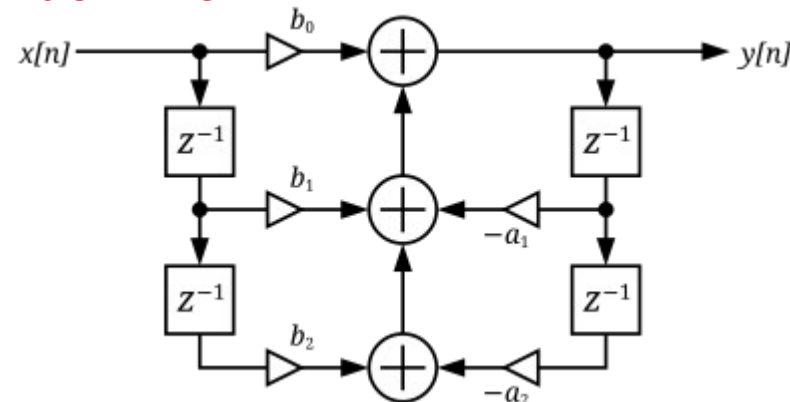
Um filtro digital é caracterizado por sua **função de transferência**, ou de forma equivalente, sua equação de diferença.

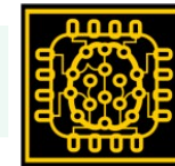
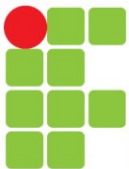
A análise matemática da função de transferência pode descrever como ela responderá a qualquer entrada. Como tal, projetar um filtro consiste em desenvolver especificações apropriadas ao problema.

Exemplo: filtro passa-baixo de 2ª ordem com uma frequência de corte específica) e depois produzir uma função de transferência que atenda às especificações.

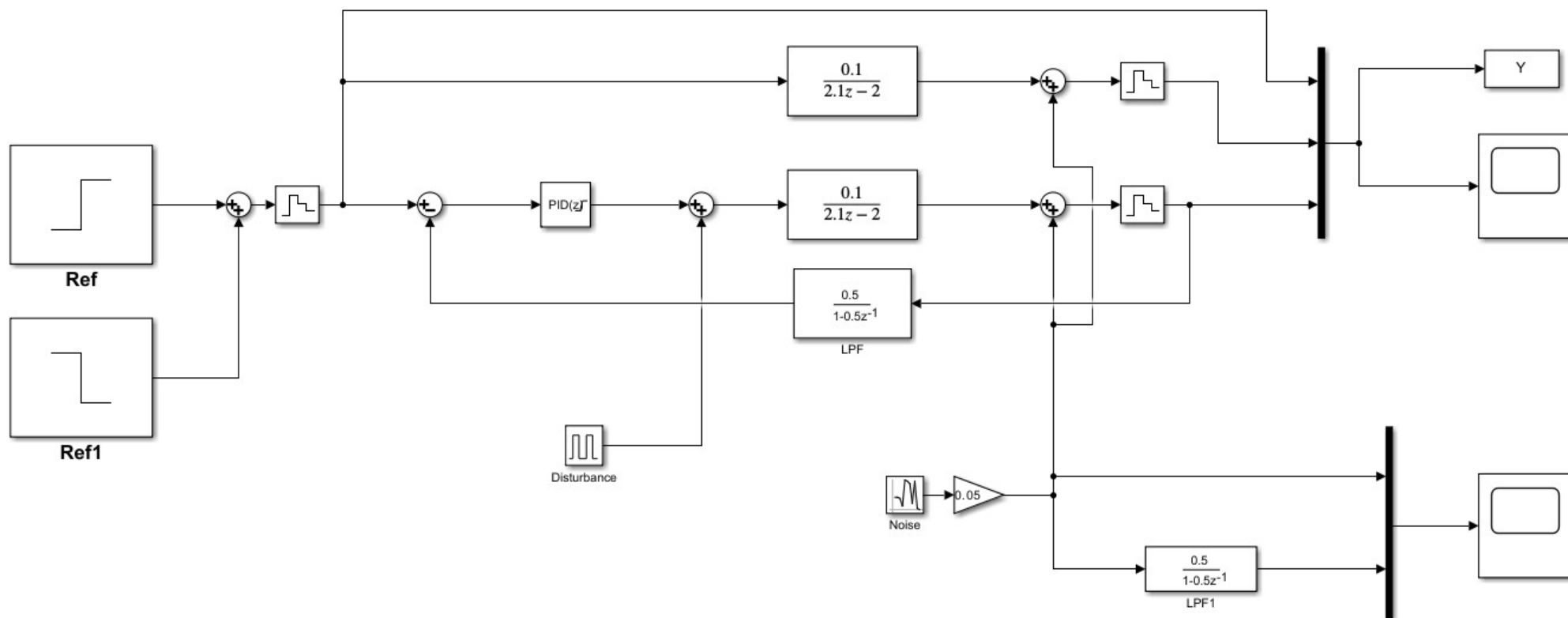
A função de transferência para um filtro digital linear e invariante no tempo pode ser expressa como uma função de transferência no **domínio Z**.

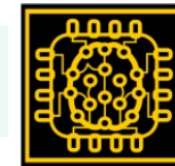
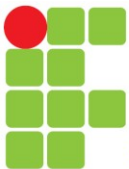
$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_M z^{-M}}$$





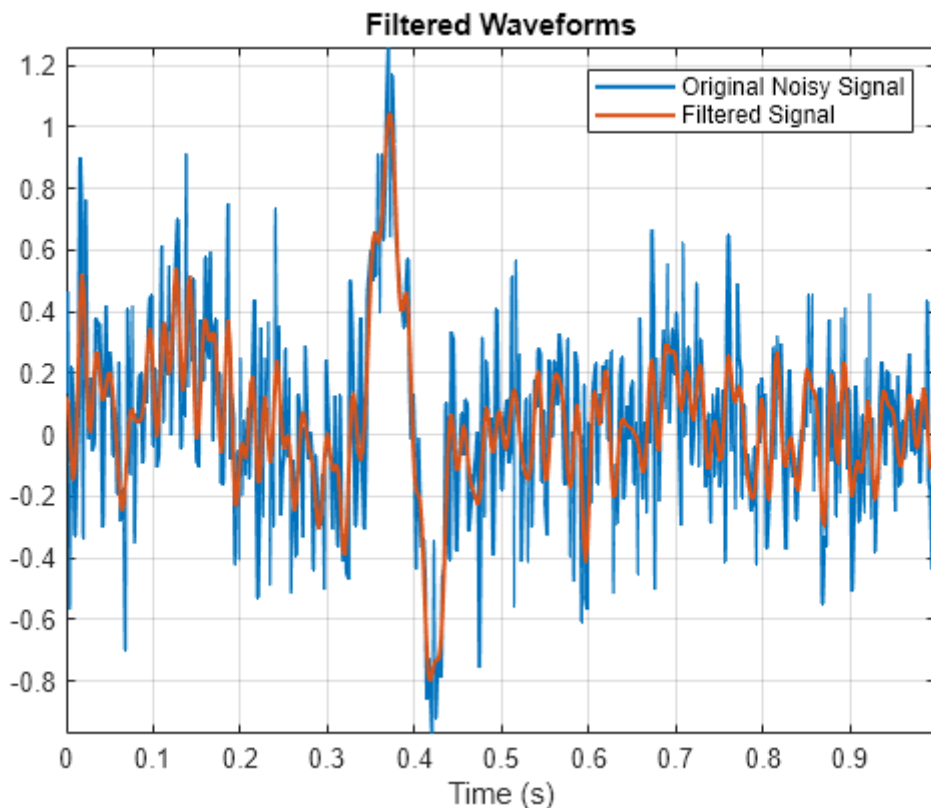
Exemplo no Matlab



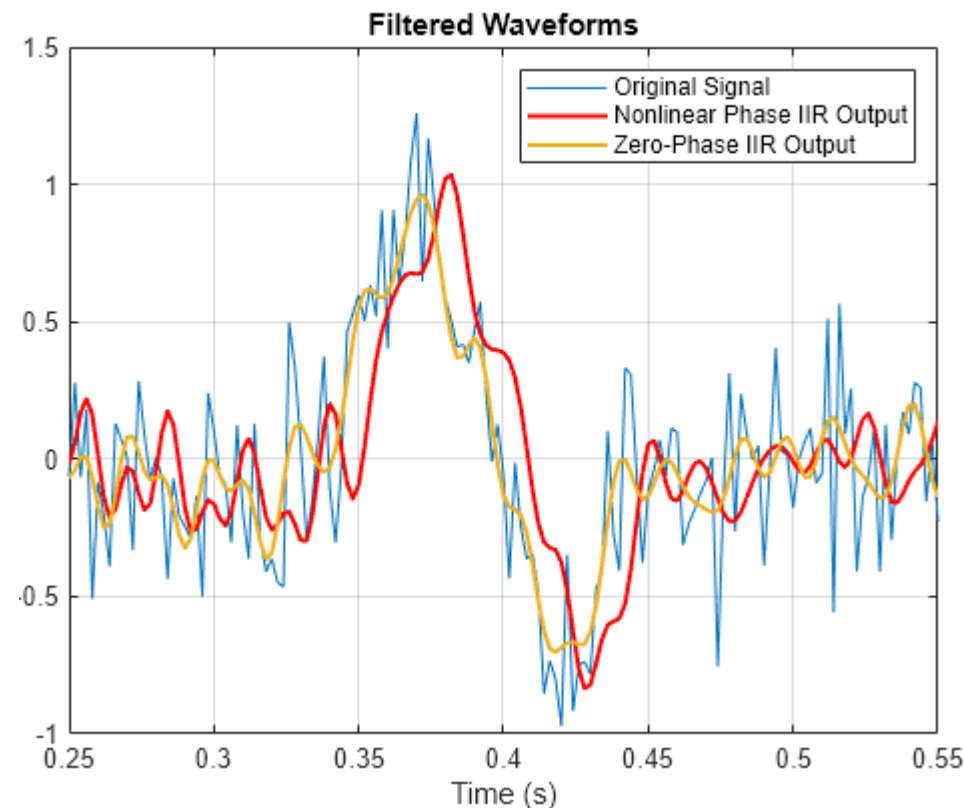


Exemplos no Matlab

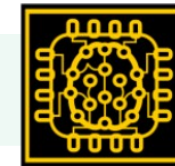
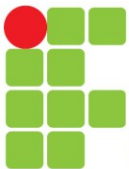
70th FIR LPF para ECG



7th IIR LPF para ECG



<https://www.mathworks.com/help/signal/ug/practical-introduction-to-digital-filtering.html>



Material de Apoio

Kyle Webb, ENGR 202 – Electrical Fundamentals II, Oregon State University. Disponível em: https://web.engr.oregonstate.edu/~webbky/ENGR202_files/. Acesso em Abr 03, 2025.

Mandal & Asif, Chapter 7 – Continuous-time Filters, Cambridge University, 2007. Disponível em: https://www.cambridge.org/us/files/8913/6681/5723/4420_Chapter_7_-_Continuous-time_filters.pdf. Acesso em Abr 03, 2025.

Discretizing a transfer function from s-domain (continuous) to z-domain (discrete), X-Engineer.org, 2025. Disponível em: <https://x-engineer.org/discretizing-transfer-function/>. Acesso em Abr 04, 2025.

TUZLUKOV, Vyacheslav. Signal processing noise. CRC Press, 2018. ISBN: 9781315220147. DOI: 10.1201/9781315220147. Disponível para download em: <https://www.pdfdrive.to/filedownload/signal-processing-noise>. Acesso em Abr 02, 2025.

WANG, Caishi. Properties of delta functions of a class of observables on white noise functionals. Journal of mathematical analysis and applications, v. 329, n. 2, p. 913-921, 2007.

SHONGWE, Thokozani; VINCK, AJ Han; FERREIRA, Hendrik C. A study on impulse noise and its models. SAIEE Africa Research Journal, v. 106, n. 3, p. 119-131, 2015.

MATHURANATHAN, White Noise : Simulation and Analysis using Matlab, Gaussian Waves signal Processing For Communication Systems, 2013. Disponível em: <https://www.gaussianwaves.com/2013/11/simulation-and-analysis-of-white-noise-in-matlab/>. Acesso em Abr 02, 2025.

AGAMALOV, Oleg N. Design of control systems based on vector error. WSEAS Transactions on Systems and Control, v. 4, n. 9, p. 476-485, 2009.

CHEN, Wen-Hua *et al.* Disturbance-observer-based control and related methods—An overview. IEEE Transactions on industrial electronics, v. 63, n. 2, p. 1083-1095, 2015. DOI: 10.1109/TIE.2015.2478397.

A. De Carvalho, J. I. Da Silva Filho, M. C. Mario, M. F. Blos and C. M. da Cruz, "A Study of Paraconsistent Artificial Neural Cell of Learning Applied as PAL2v Filter," in IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 1, pp. 202-209, Jan. 2018, DOI: 10.1109/TLA.2018.8291474.

MANDAL, Mrinal Kr; ASIF, Amir. Continuous and discrete time signals and systems. Cambridge, 2007. Disponível em: <https://archive.org/download/ContinuousAndDiscreteTimeSignalsAndSystemsMandalM.AsifA.2007/Continuous%20and%20Discrete%20Time%20Signals%20and%20Systems%20-%20Mandal%20M.%20%26%20Asif%20A.%20%5B2007%5D.pdf>. Acesso em Abr 03, 2025.