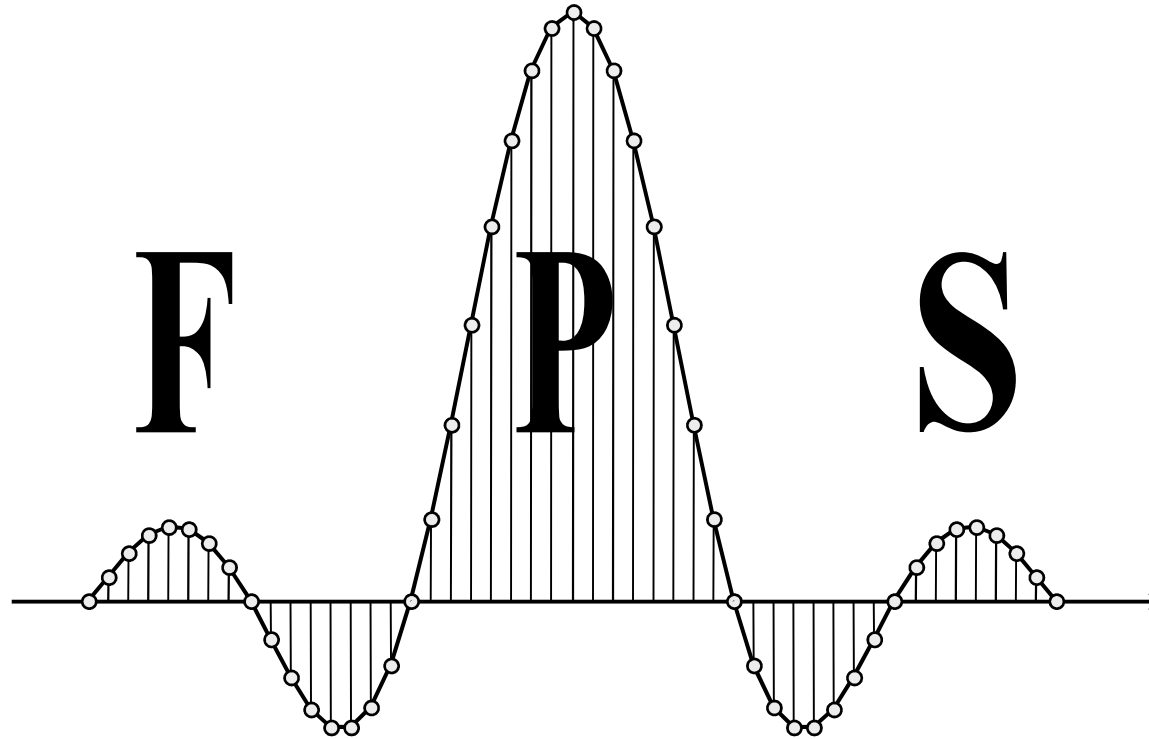
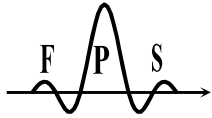


# L.EEC 025

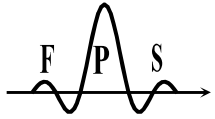


Bem-Vindos !



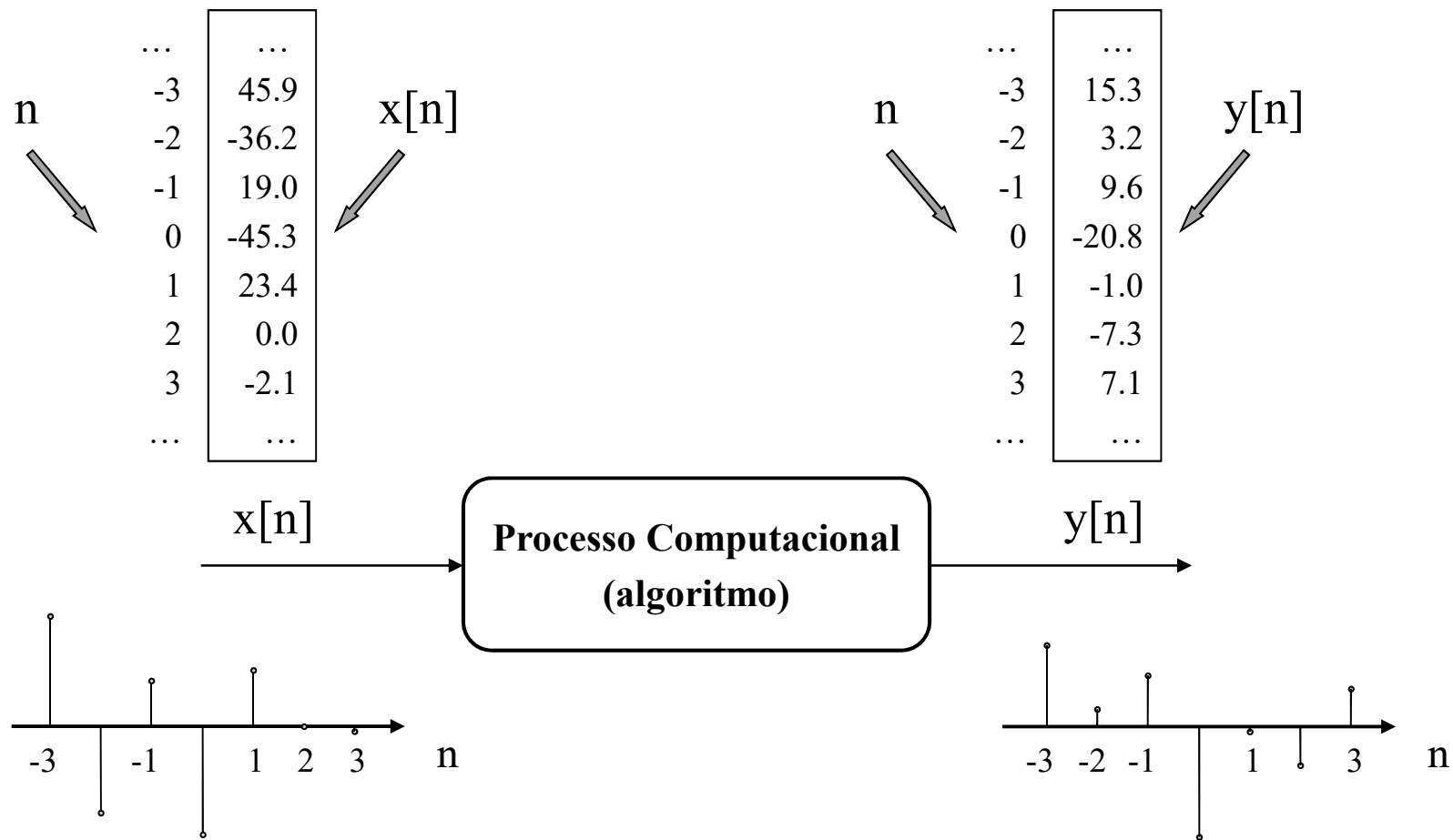
# Sumário

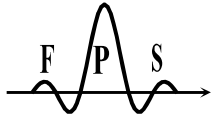
- *Apresentação da unidade curricular*
  - *Processamento de Sinal*
    - *o que é ?*
    - *sinais discretos = sinais digitais ?*
    - *como se obtêm os sinais digitais ?*
    - *vocação do Proc. Sinal ?*
    - *como nasceu o Proc. Sinal ?*
    - *vantagens em relação ao processamento analógico ?*
    - *aplicações do Proc. Sinal ?*
  - *L.EEC 025*
    - *a árvore e a floresta*
    - *objetivos da unidade curricular*
    - *conteúdos previstos*
    - *metodologia*
    - *avaliação*



# Processamento de Sinal

- O que é ?
  - consiste em submeter uma sequência de números a um processo computacional que fornece uma outra sequência à sua saída



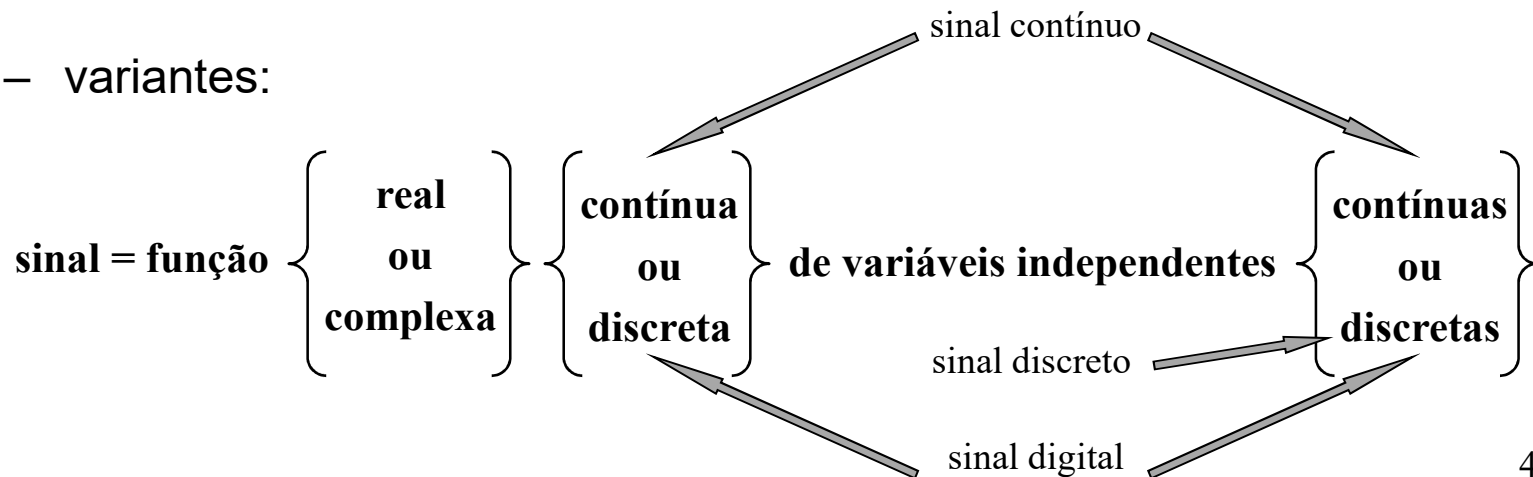


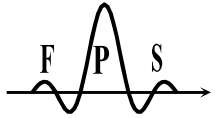
# Processamento de Sinal

- Sinais discretos = sinais digitais ?

- os sinais retratam ocorrências naturais (e.g. fala, imagem) ou sintetizadas, isto é, geradas por computador (e.g. função trigonométrica, sequência pseudo-aleatória de números, música sintetizada, ...)
- um sinal é genericamente uma função de uma ou mais variáveis independentes (e.g. o tempo, a posição, a temperatura, a pressão)
  - sinal escalar (unidimensional): função de uma única variável independente
  - sinal vectorial (multidimensional): função de duas ou mais variáveis independentes (e.g. uma imagem)

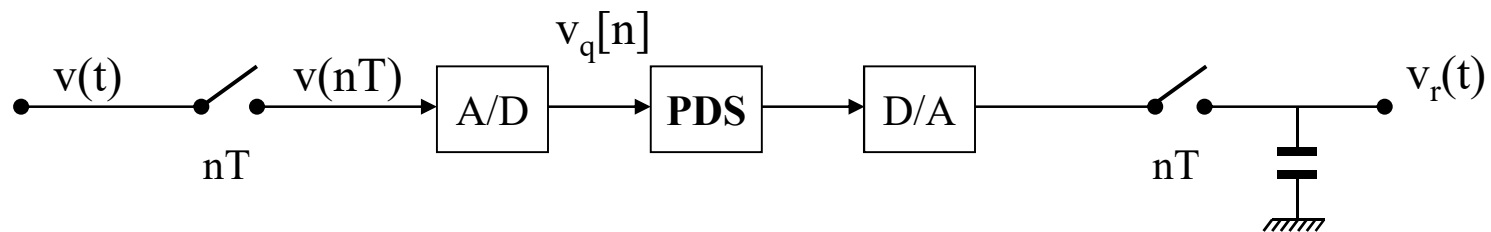
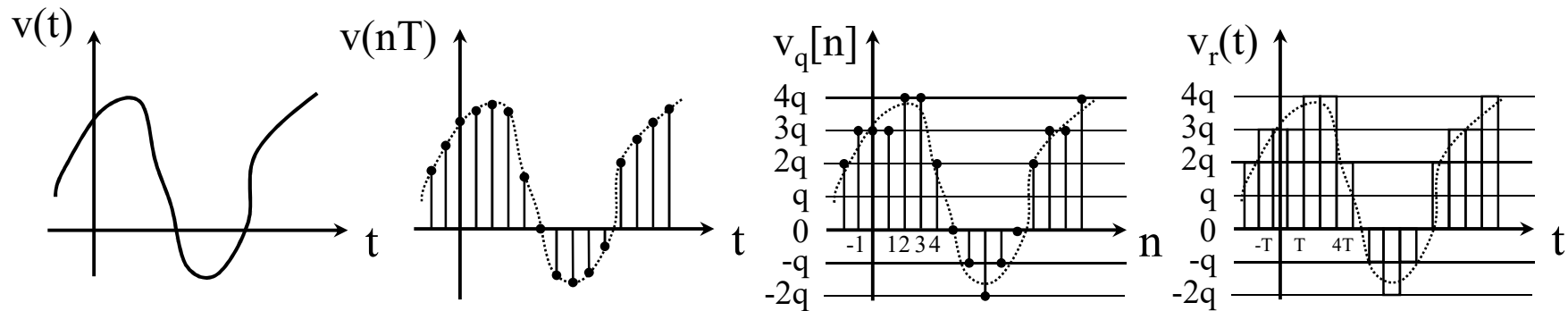
- variantes:

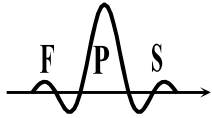




# Processamento de Sinal

- Como se obtêm os sinais digitais ?
  - há fontes de sinal que são inerentemente discretas e digitais:
    - número de presenças nas aulas teóricas de FPS ao longo do semestre,
    - número de carros em cima da ponte da Arrábida ao bater de cada hora, ...
  - a maior parte das seqüências discretas resultam da amostragem (discretização no tempo) de sinais contínuos
    - de modo a poder ser processado por um processador digital de sinal, o sinal discreto é convertido para um sinal digital através de uma segunda fase de discretização: a relativa à sua grandeza (e.g. a tensão)

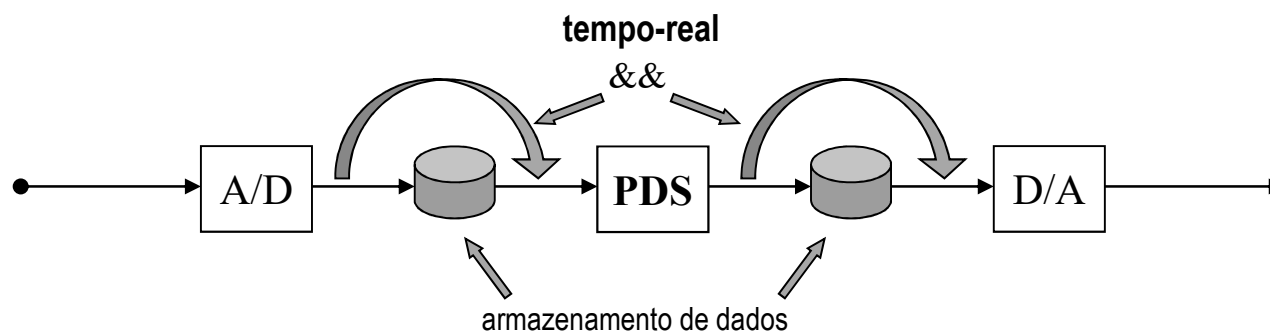


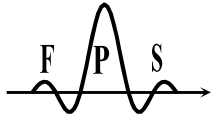


# Processamento de Sinal

- **Vocação do Proc. Sinal ?**

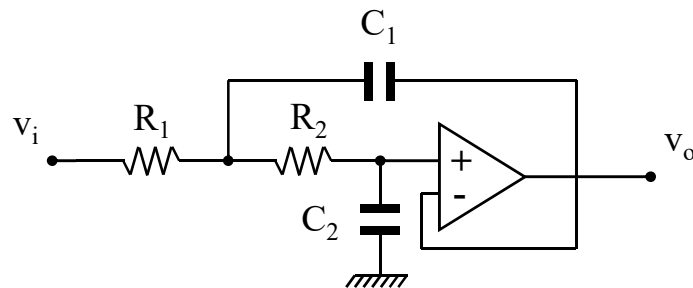
- representar, analisar (interpretar), transformar ou sintetizar sinais de acordo com algum objetivo e atendendo à sua informação
- articular três domínios complementares e mutuamente dependentes:
  - **teoria dos sinais e sistemas discretos**, com uma particular ênfase para os sistemas lineares e invariantes no tempo (por causa da existência de muitas ferramentas de análise e projeto) - exemplo: análise de Fourier
  - **tecnologia** - exemplo: *hardware* dedicado para o cálculo rápido da DFT
  - **aplicação** - exemplo: análise espectral
- operar em **tempo-real** (a cadência de dados à saída decorre, de forma precisa, da cadência de dados à entrada) ou em tempo diferido (*i.e. off-line*):



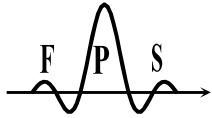


# Processamento de Sinal

- Como nasceu o Proc. Sinal ?
  - em meados do século 17, com o desenvolvimento de métodos tais como a integração numérica e a interpolação numérica para resolver problemas físicos relacionados com variáveis e funções contínuas
  - com o advento dos computadores, por volta de 1960, a área de PDS autonomizou-se como área de investigação de pleno direito, apesar de inicialmente de se centrar sobretudo na simulação de processos analógicos através de computadores
- **exemplo prático:** dado um filtro ativo de 2ª ordem, do tipo passa-baixo, qual a perturbação criada na resposta em magnitude e fase do filtro quando os seus componentes exibem desvios de  $\pm 10\%$  em relação aos valores nominais ?



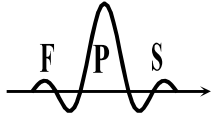
$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{1 + s(R_1 + R_2)C_2 + s^2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$



# Processamento de Sinal

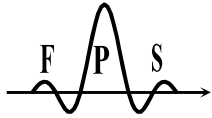
- Como nasceu o Proc. Sinal ? (cont.)
  - em resultado de avanços importantes na área de Proc. Sinal
    - a divulgação, em 1965, por Cooley e Tukey, de um algoritmo para o cálculo rápido da Transformada de Fourier Discreta (DFT) [note-se que a Transformada de Fourier não pode ser calculada por computador, porém uma sua amostragem pode e, para sinais discretos e finitos, a DFT é uma representação completa e exata -e não uma simples aproximação- do sinal], viabilizando definitivamente a sua execução em tempo-real,
    - o projeto de filtros digitais não à imagem de filtros analógicos, mas usando métodos discretos, eficientes e mesmo **ótimos** de projeto
  - estes e outros avanços, nomeadamente ao nível da microeletrónica, tornaram viável e praticável:
    - a simulação e ensaio **iterativo** de algoritmos antes da sua realização,
    - a implementação em *hardware* dedicado e a baixo custo, de algoritmos de PDS complexos e ambiciosos, como por exemplo, a compressão e codificação de sinais de fala (e.g. em telefones celulares), o reconhecimento e síntese de sinais de fala, a reprodução de música comprimida a partir de memórias de estado sólido utilizadas por alguns leitores de “MP3”, etc.
    - o avanço da área de PDS por avenidas impossíveis de percorrer usando técnicas de processamento analógico (e.g. deteção e correção de erros),





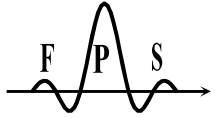
# Processamento de Sinal

- Vantagens em relação ao processamento analógico ?
  - decorre, desde logo, da vantagem dos circuitos digitais:
    - **insensibilidade:** muito menor sensibilidade (podendo mesmo falar-se em independência) às tolerâncias e envelhecimento de componentes, à variação de temperatura, etc.
    - **repetibilidade:** os sistemas podem ser replicados com características exatas
    - **integração:** possibilidade de integrar módulos de processamento
  - **precisão:** o processamento digital pode ser realizado com uma qualidade predefinida pela resolução numérica (# bits usados para representar números e efetuar cálculos)
  - **dinâmica:** é possível acomodar a representação de sinais de grande gama dinâmica através do uso de representação e aritmética em vírgula flutuante
  - **multiprocessamento:** facilidade de partilhar um processador por vários sinais processados diferente e independentemente



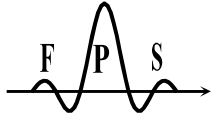
# Processamento de Sinal

- Vantagens (cont.)
  - **reconfiguração**: facilidade de alterar ou reconfigurar o processamento executado através de uma simples reprogramação das operações aritméticas a calcular
    - NOTA: desta vantagem decorre a possibilidade de ajustar algoritmos de processamento durante a sua operação, o que representa por si uma área importante que é a do **processamento adaptativo** e de que é exemplo a filtragem adaptativa (sistema linear mas variante no tempo)
  - o processamento digital oferece outras vantagens inexistentes no processamento analógico:
    - não há problemas de “carga” entre andares de processamento em cascata,
    - é possível projetar filtros digitais com fase rigorosamente linear,
    - é possível projetar filtros com características de resposta em frequência rigorosamente complementares,
    - o armazenamento de sinais digitais pode ser realizado em diferentes suportes (magnético, ótico, memórias de estado-sólido) sem qualquer perda de informação ou problemas de envelhecimento,
    - é possível o processamento de sinais em tempo não-real (*i.e.* “off-line”),



# Processamento de Sinal

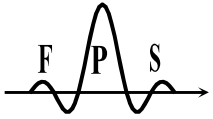
- Vantagens (cont.)
  - o processamento digital oferece outras vantagens (cont.) :
    - usando técnicas de compressão de dados, pode ser possível usar uma menor largura de banda para transmitir ou armazenar sinais, do que a requerida pela versão analógica desses sinais.
- Mas também há desvantagens !
  - sistemas digitais são em geral mais complexos do que os analógicos,
  - a largura de banda requerida para representar um sinal digital não comprimido é superior à associada ao sinal analógico correspondente,
  - a máxima largura de banda de um sinal analógico que é possível representar digitalmente depende das limitações tecnológicas dos conversores A/D e D/A (dados de Sanjit Mitra, 1998):
    - resolução entre 10 - 16 bits : frequência máxima de amostragem  $\approx 10$  MHz
    - resolução na ordem 6 bits: frequência máxima de amostragem  $\approx 1$  GHz
- Para que lado pende o balanço ?



# Processamento de Sinal

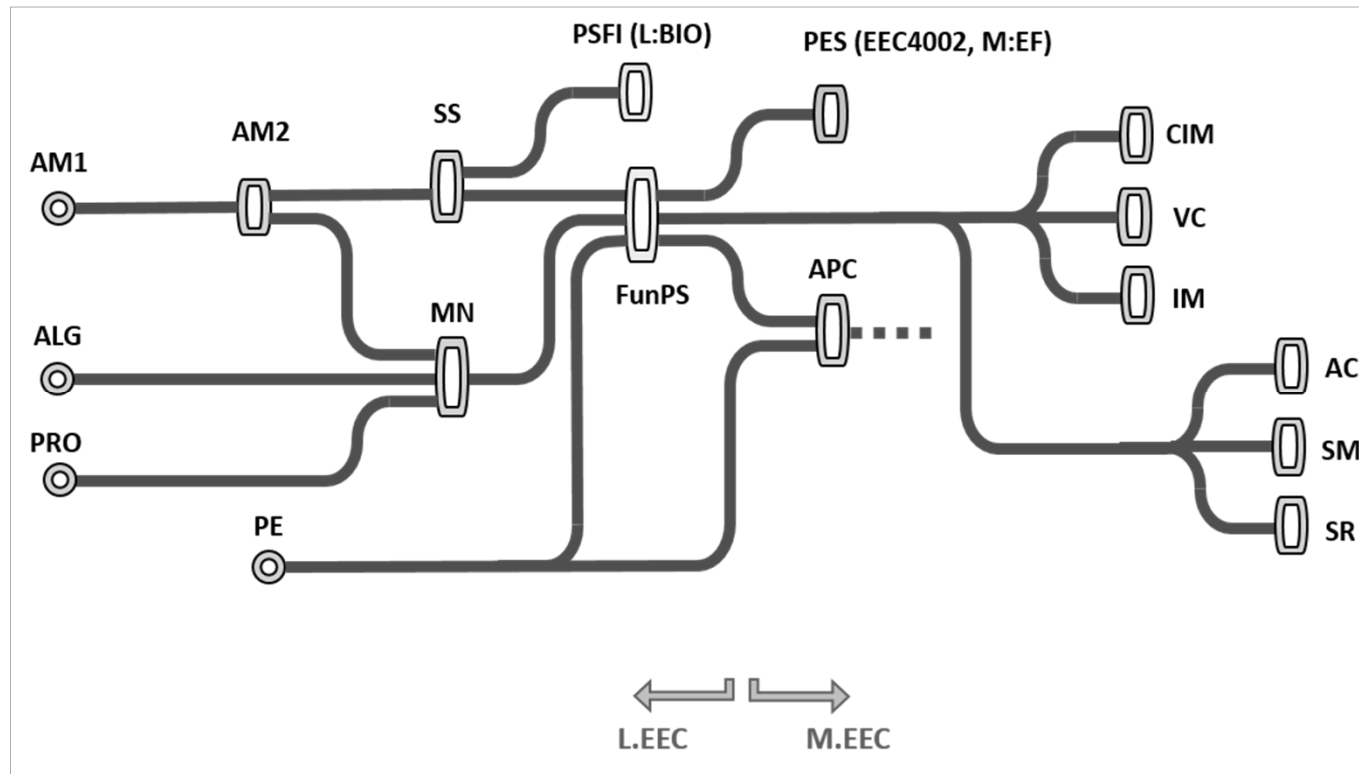
- Aplicações

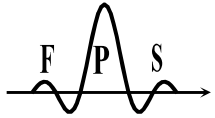
- telecomunicações
  - telefonia celular
  - reconhecimento e síntese de fala
  - compressão de vídeo e áudio digitais (e.g. segundo normas MPEG)
  - cancelamento de ecos e ruído através de filtragem adaptativa
  - modulação digital (e.g. sistema DAB, TDT)
- medicina (ECG, EEG, EGG... )
- entretenimento (MP3, MP4, *streaming*... )
- sistemas militares
- eletrónica de consumo



# L.EEC 025

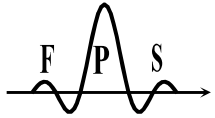
- A árvore e a floresta





# L.EEC 025

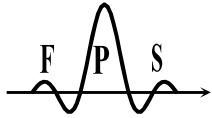
- Objetivos da unidade curricular
  - introduzir os conceitos teóricos básicos da área do Proc. Sinal
  - ilustrar as potencialidades de aplicação das técnicas de Proc. Sinal
    - com especial ênfase para a filtragem digital e a análise espectral
  - formar competências de análise e projeto de sistemas discretos
- Bibliografia
  - “Discrete-Time Signal Processing”, Oppenheim, Shafer, 3.Ed. 2009
  - apontamentos e compilação de problemas da unidade curricular
  - “Digital Signal Processing”, Sanjit Mitra, 2006
  - “DSP First”, McClellan, Schafer, Yoder, 1999
  - “Digital signal processing”, John G. Proakis, Pearson, 2006



# L.EEC 025

- Conteúdos previstos

- caracterização e representação de sinais e sistemas discretos (revisões)
- sinais discretos determinísticos e aleatórios
- a transformada de Fourier discreta em  $n$
- a amostragem e reconstrução de sinais
- a Transformada Z
- caracterização em Z de sistemas lineares e invariantes no tempo
- sistema inverso, passa-tudo, sistemas de fase mínima, linear e máxima, sistemas FIR de fase linear
- projeto de filtros digitais de resposta impulsional infinita (IIR)
- projeto de filtros digitais de resposta impulsional finita (FIR)
- estruturas para a implementação de sistemas discretos IIR e FIR
- *filtros adaptativos*
- *equivalentes discretos de sistemas contínuos* (havendo margem temporal)
- a transformada de Fourier discreta (DFT)
- convolução linear usando a DFT (havendo margem temporal)
- cálculo rápido da DFT (a FFT)
- aplicação da FFT na filtragem FIR rápida, no cálculo da correlação e na estimação espectral



# L.EEC 025

- Metodologia

- aulas teóricas

- “*flipped classroom-oriented*” resumo dos conteúdos da unidade curricular
- introdução a problemas ilustrativos de Processamento de Sinal e a temas de trabalhos de laboratório
- motivação para *Questões de Verificação (extra-class, Moodle-based, individual, 25% da AD)*

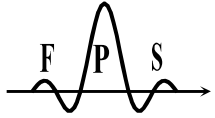
- aulas práticas laboratoriais

- “*peer-to-peer learning/assessment*” (grupos de 4 estudantes, 25% da AD)

**NOTA:** “*peer-to-peer learning/assessment*” envolve a resolução (convencional, Matlab), por um estudante, de um exercício proposto e que é explicado aos colegas de grupo e por estes avaliado; este processo é escrutinado pelo docente que intervirá apontando incorreções e validando/ajustando a avaliação atribuída pelos colegas de grupo

- trabalhos laboratoriais com base no kit *STM32F7 Discovery kit* e com objetivos de realização definidos para 1-2 semanas e avaliados pelo docente (grupos de 4 estudantes, 50% da AD)





# L.EEC 025

- Metodologia

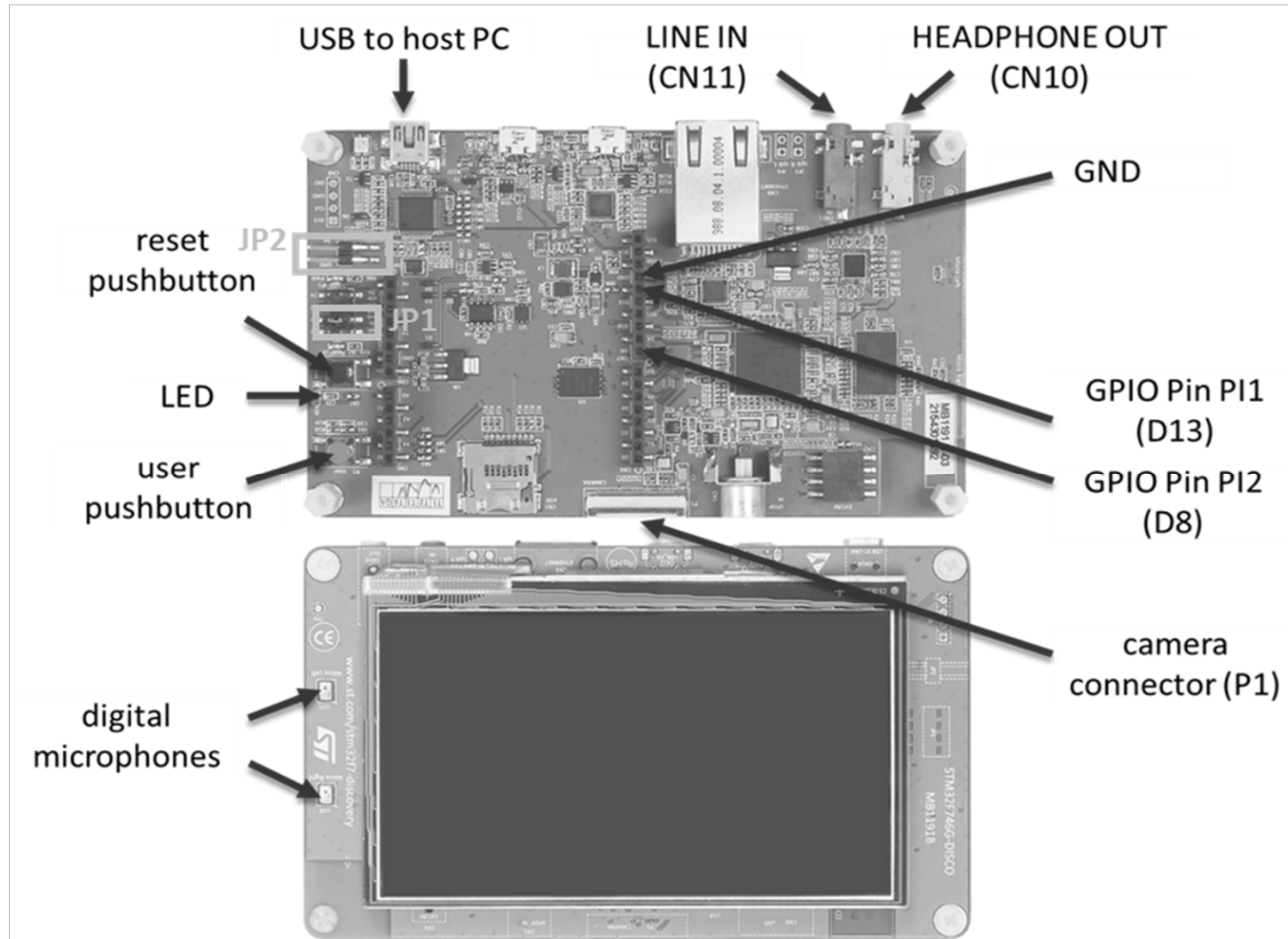
- trabalho de estudo/acompanhamento individual (*fundamental !*)
  - exploração autónoma e individual de exercícios de Proc. Sinal recorrendo frequentemente à ferramenta MATLAB (ambiente de cálculo matricial e representação gráfica, de utilização simples mas muito poderoso permitindo ensaiar sistemas de PDS e analisar muito facilmente o seu desempenho)
- avaliação
  - final =  $0.5 \cdot \text{exame} + 0.5 \cdot \text{avaliação distribuída}$

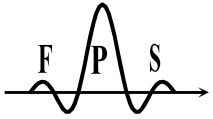
Nota: exame  $\geq 6$  val.



# L.EEC 025

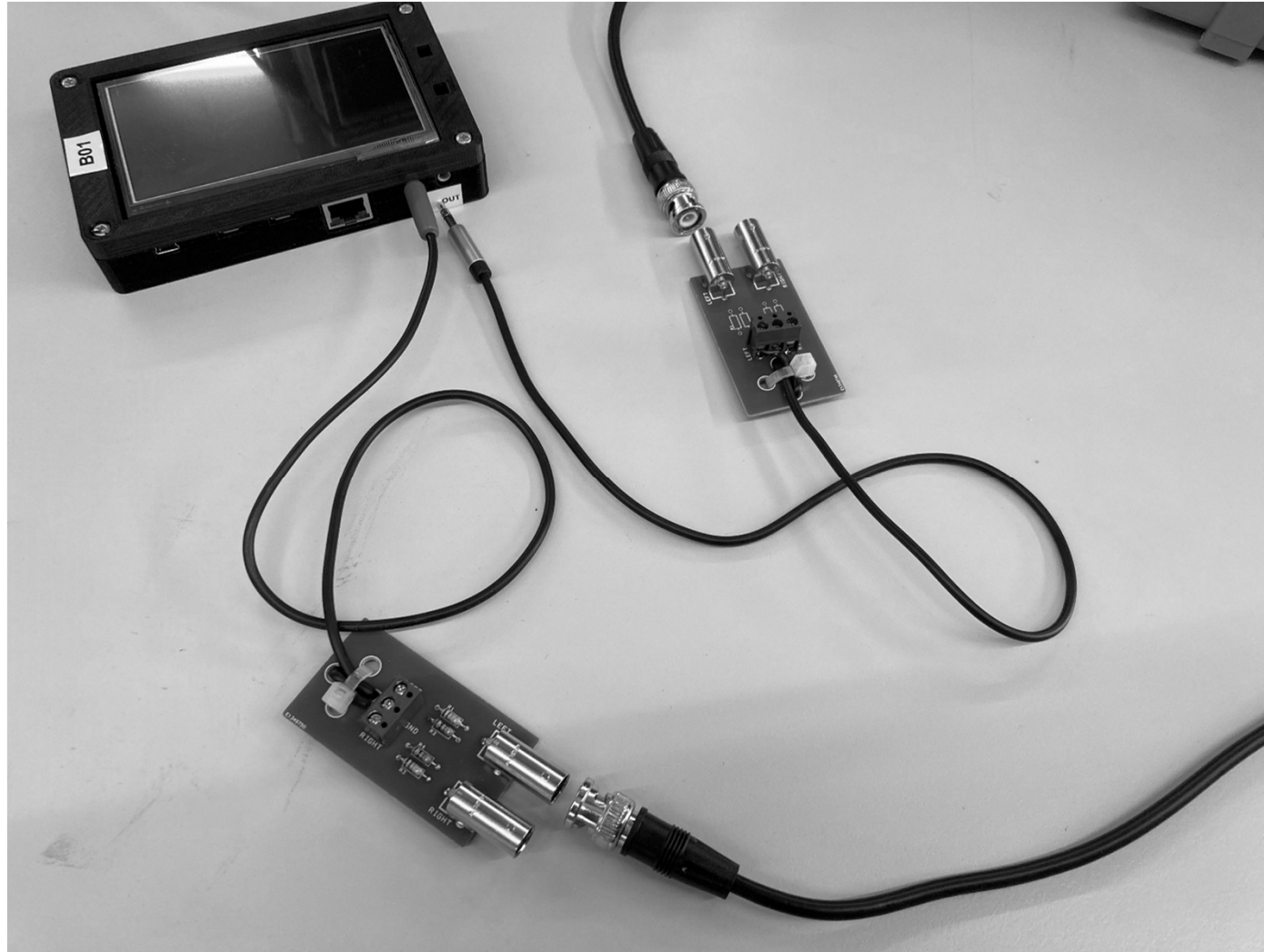
- STM32F46G Discovery kit

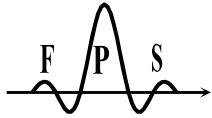




## L.EEC 025

- STM32F46G Discovery kit





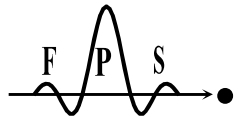
- Sobre relação entre processamento de sinal (SP), aprendizagem máquina (ML) e inteligência artificial (AI)

IEEE Signal Processing Magazine, June/July 2023 (“food for thought”)

- «[...] machine learning can be viewed as a tool in the SP toolbox [...]»
- «[A] problem with AI methods is that they operate as “black boxes,” meaning that their inner workings are not transparent or easily understandable by humans. This can make it difficult to explain how the AI system arrived at a particular decision or prediction and can also make it challenging to identify and correct errors or biases in the system.»

IEEE Signal Processing Magazine, September 2022 (“food for thought”)

- «Is ML, or deep learning (DL) mandatory for solving [a given] problem ? Does a simpler and more economic method for solving it exist ?»
- «Of course, investing in DL and AI involves delegating to the machine of power of our decisions, which comes with many ethics and equity concerns»
- «Do not let artificial intelligence blindly drive our works. Let’s allow natural intelligence to guide our thinking and our solutions»



## Conclusão

- a área do Processamento de Sinal tem verificado avanços vertiginosos nas últimas décadas e as expectativas para o futuro são enormes dados os permanentes avanços nas tecnologias de computação e o surgimento de novas aplicações e desafios em resultado da convergência entre as telecomunicações, os computadores e o processamento de sinal
- uma unidade curricular semestral em Processamento de Sinal nunca poderia, pois, ser exaustiva
- L.EEC 025 inspira-se no espírito subjacente a um *textbook* de referência em Processamento de Sinal:

“the purpose of a fundamental textbook should be to uncover rather than to cover a subject” - Oppenheim