

Discriminação em tempo real de sinais de peixes elétricos pulsadores usando FPGAs

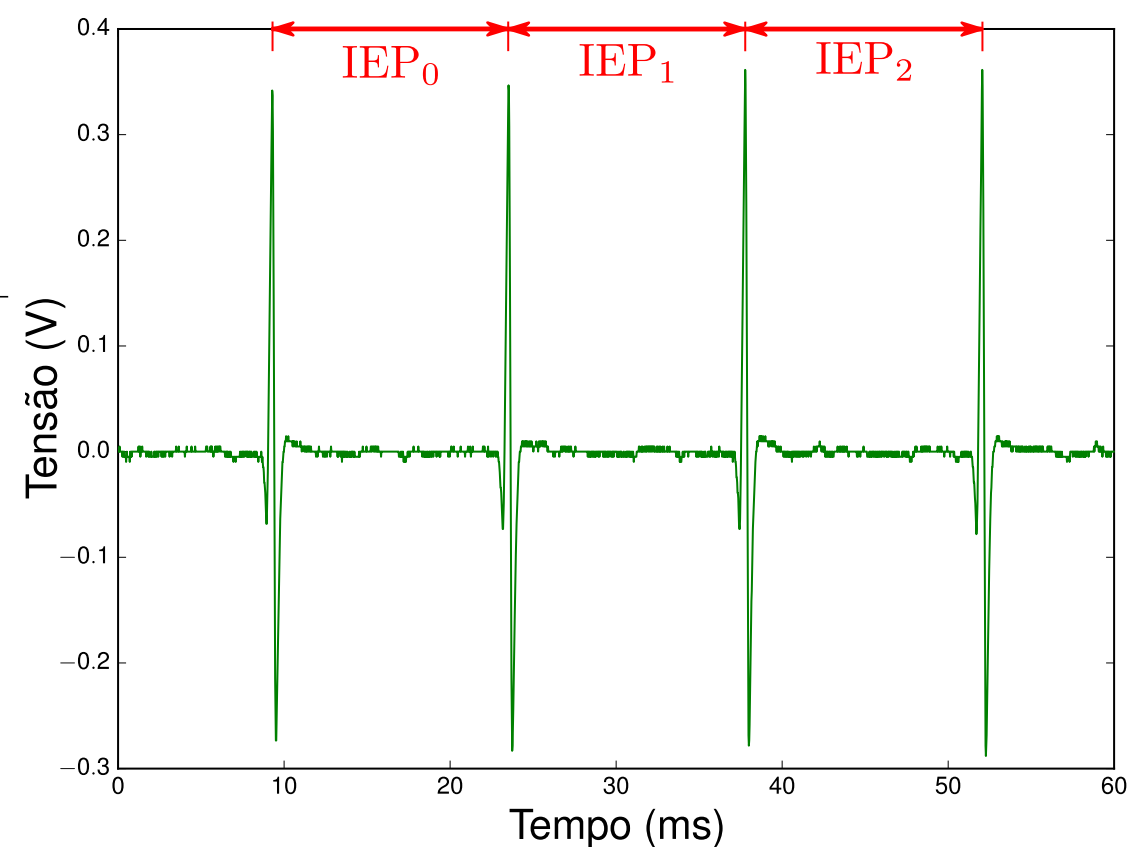
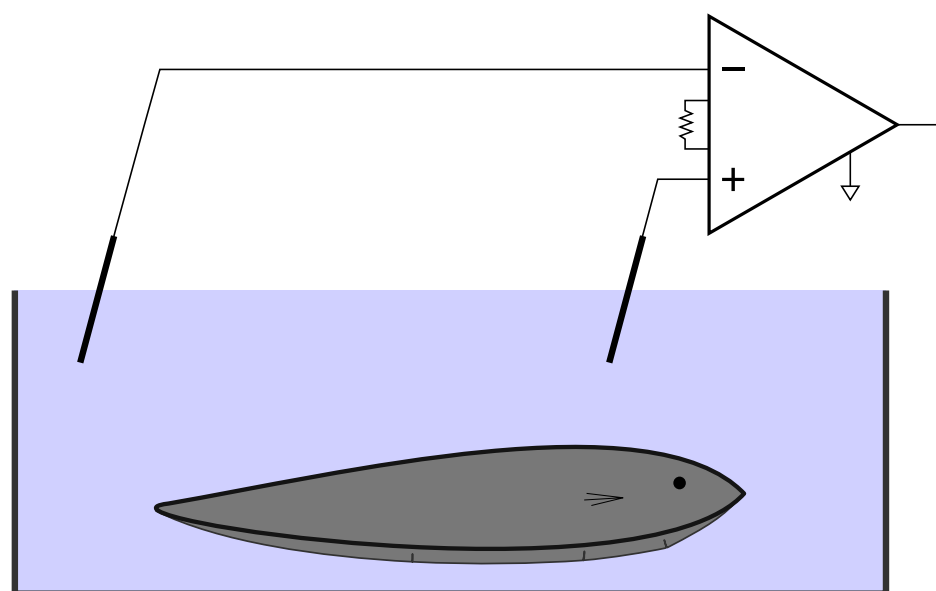
Paulo Matias

Orientador: Prof. Dr. Jan Frans Willem Slaets

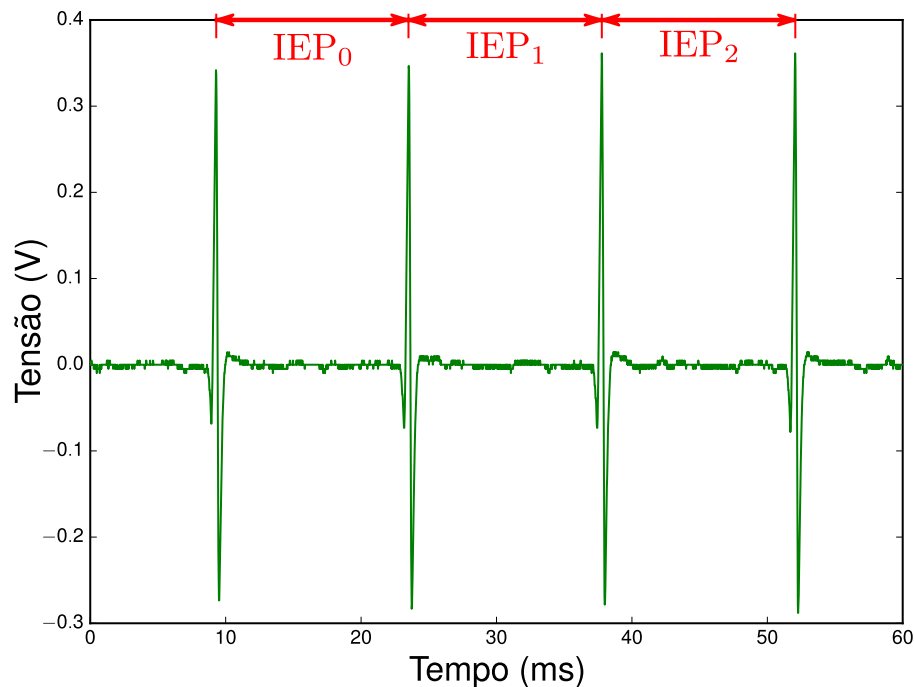


Grupo de Física Computacional e Instrumentação Aplicada
Departamento de Física e Ciência Interdisciplinar
Instituto de Física de São Carlos
Universidade de São Paulo

Objeto de estudo: *Gymnotus* sp. (tuvira)



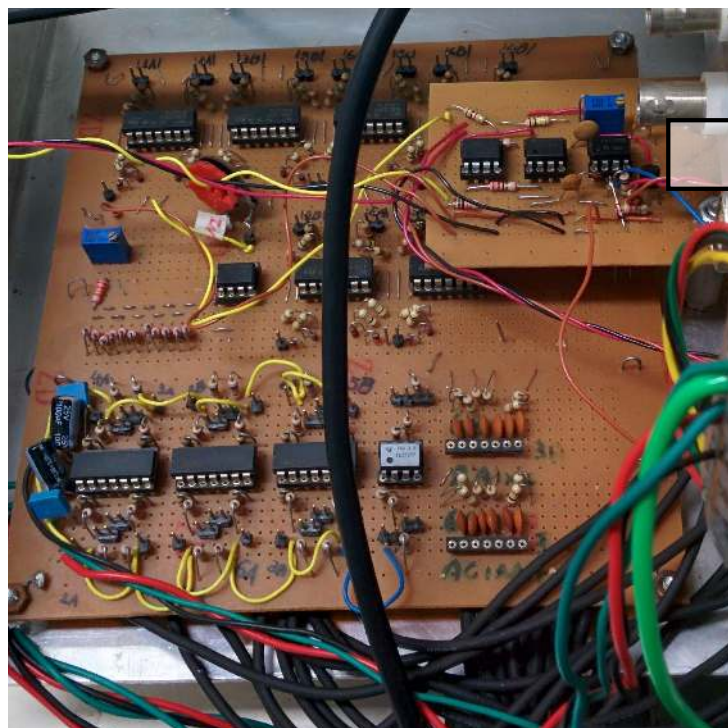
Motivação



- Compreensão de sistemas de comunicação básicos (*baixo nível*) da natureza.
- Estudo da ocorrência de mecanismos naturais de multiplexação em um canal comum.
- Aplicações (e.g. possível “sensor” de vazamento de petróleo).

Medir sinais de um único peixe é “simples”

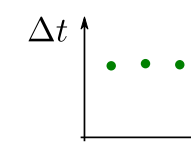
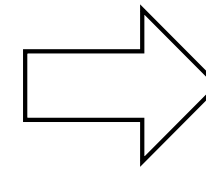
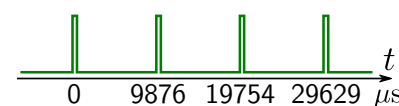
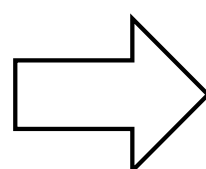
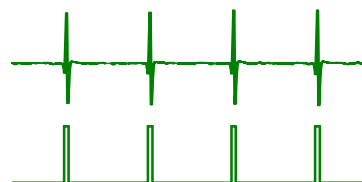
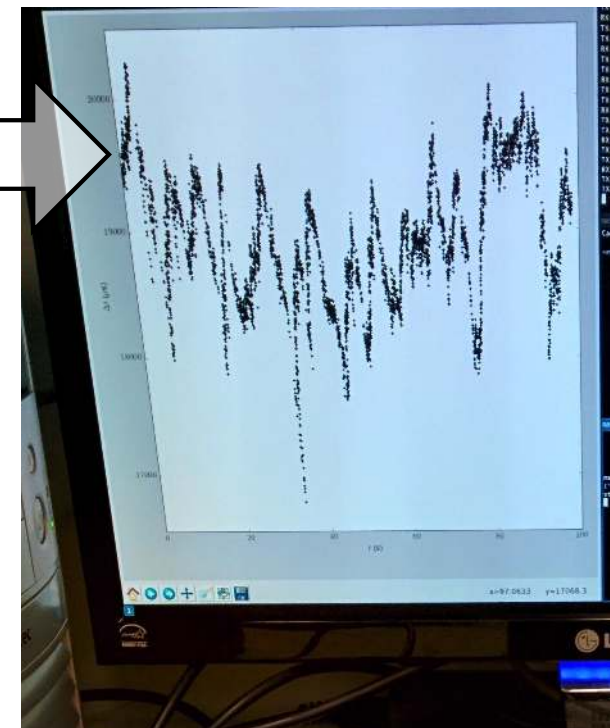
Discriminação



Deteccão de *timestamps*



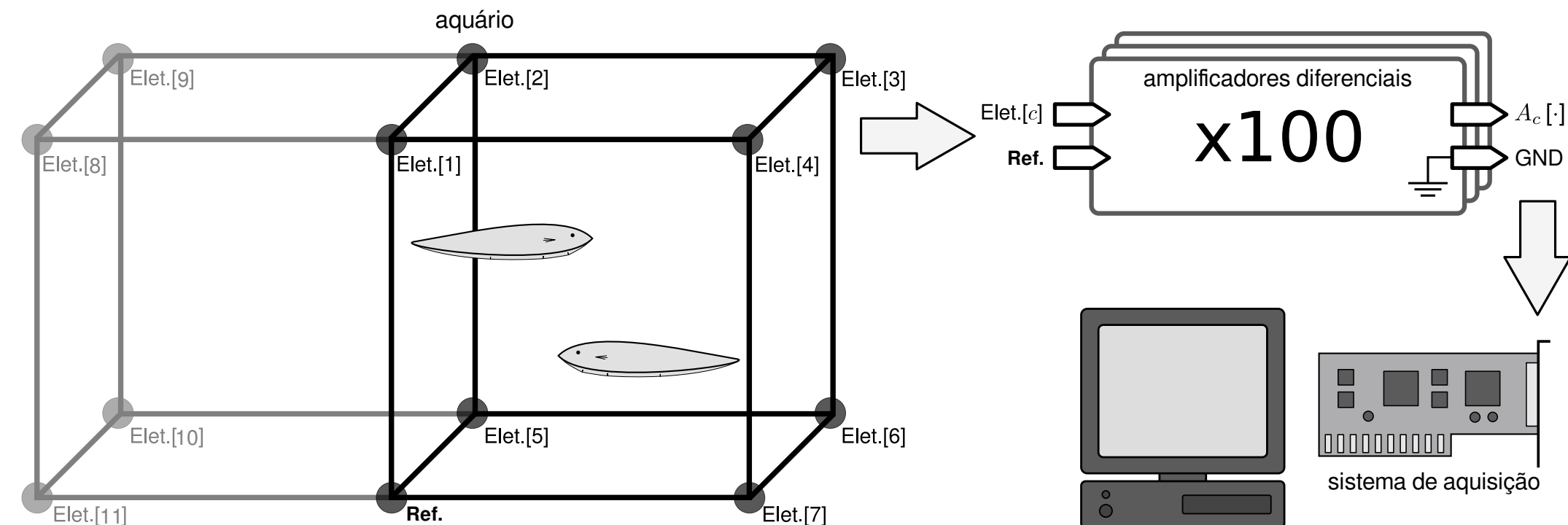
Intervalo Entre Pulsos (IEP)



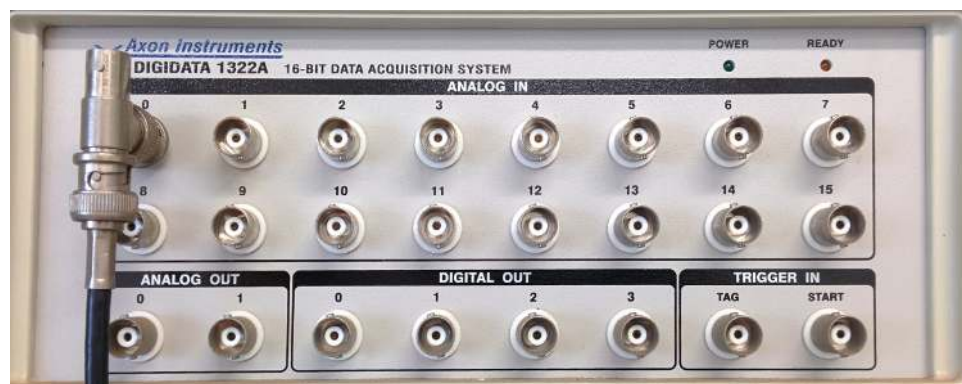
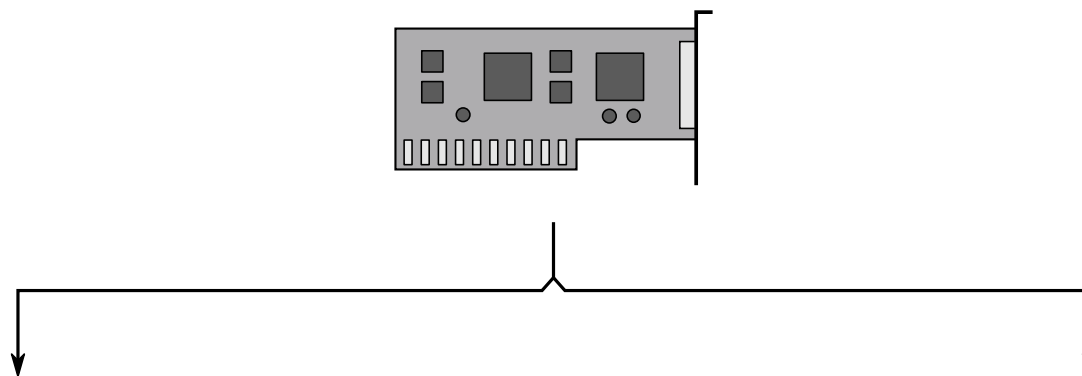
Objetivos

- Definir o **estado da arte** em classificação da origem de DOEs (descargas de órgão elétrico), permitindo:
 - Experimentos *in vivo* com mais de um animal.
 - Alto grau de naturalismo.
- Realizar a detecção em **tempo real**, permitindo:
 - Propor experimentos em *closed loop* com modelo de *peixe artificial*.
 - Mimetizar tempo de resposta de circuitos neuronais do cérebro do peixe.

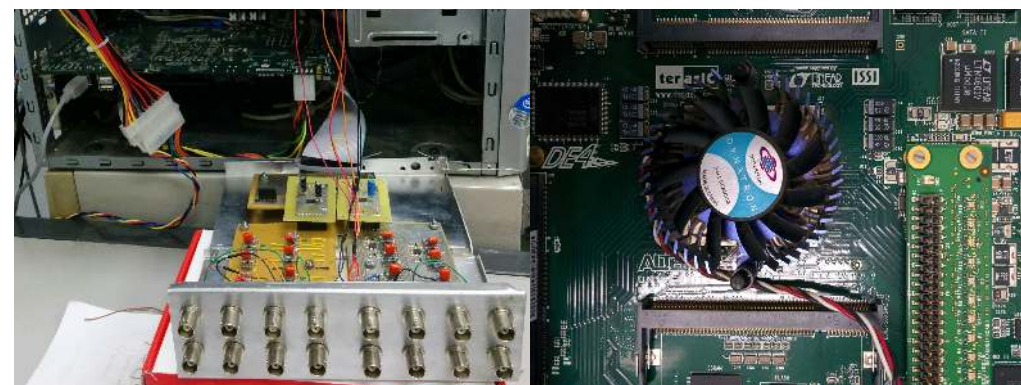
Montagem experimental



Sistemas de aquisição

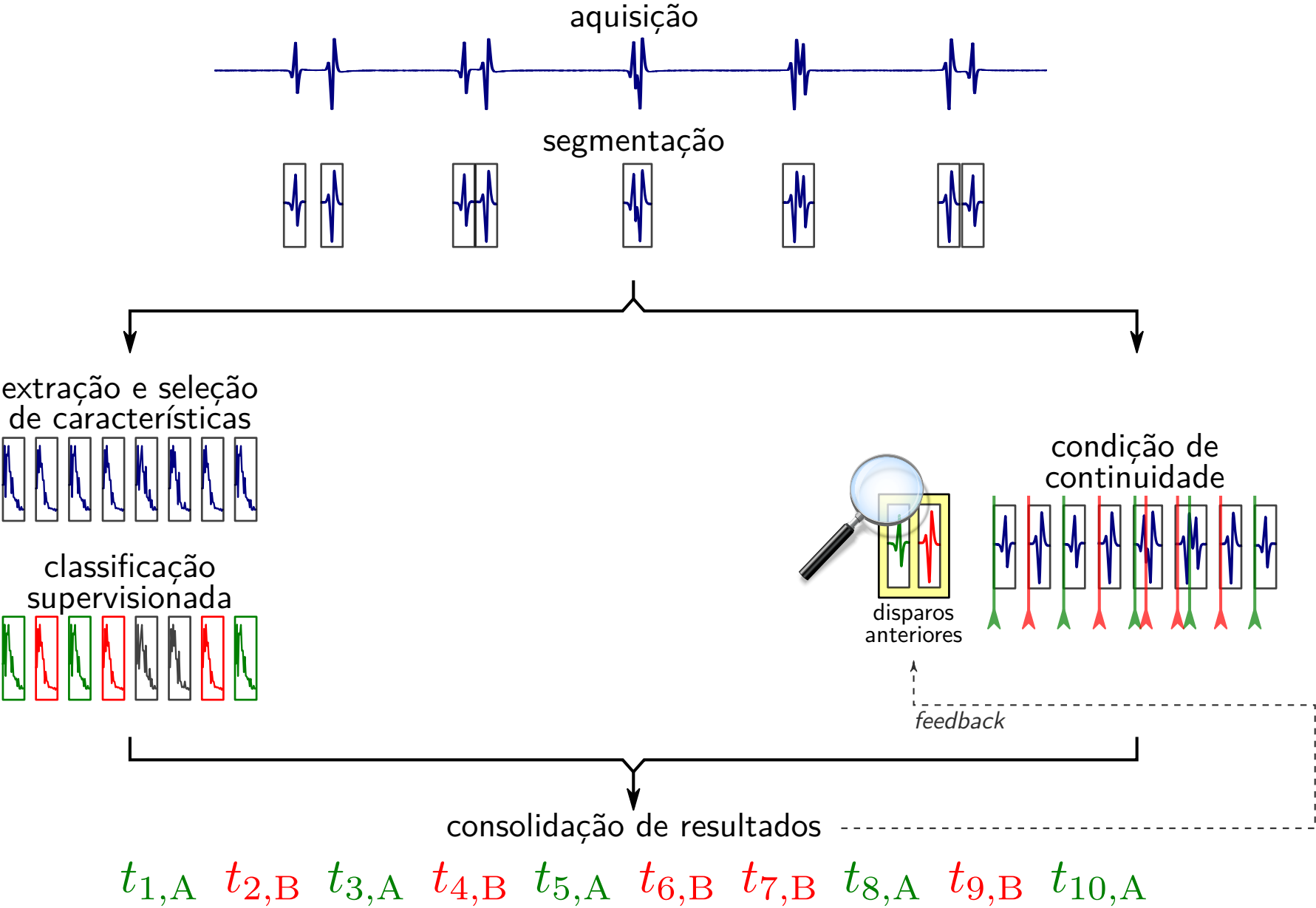


aquisição *off-line*

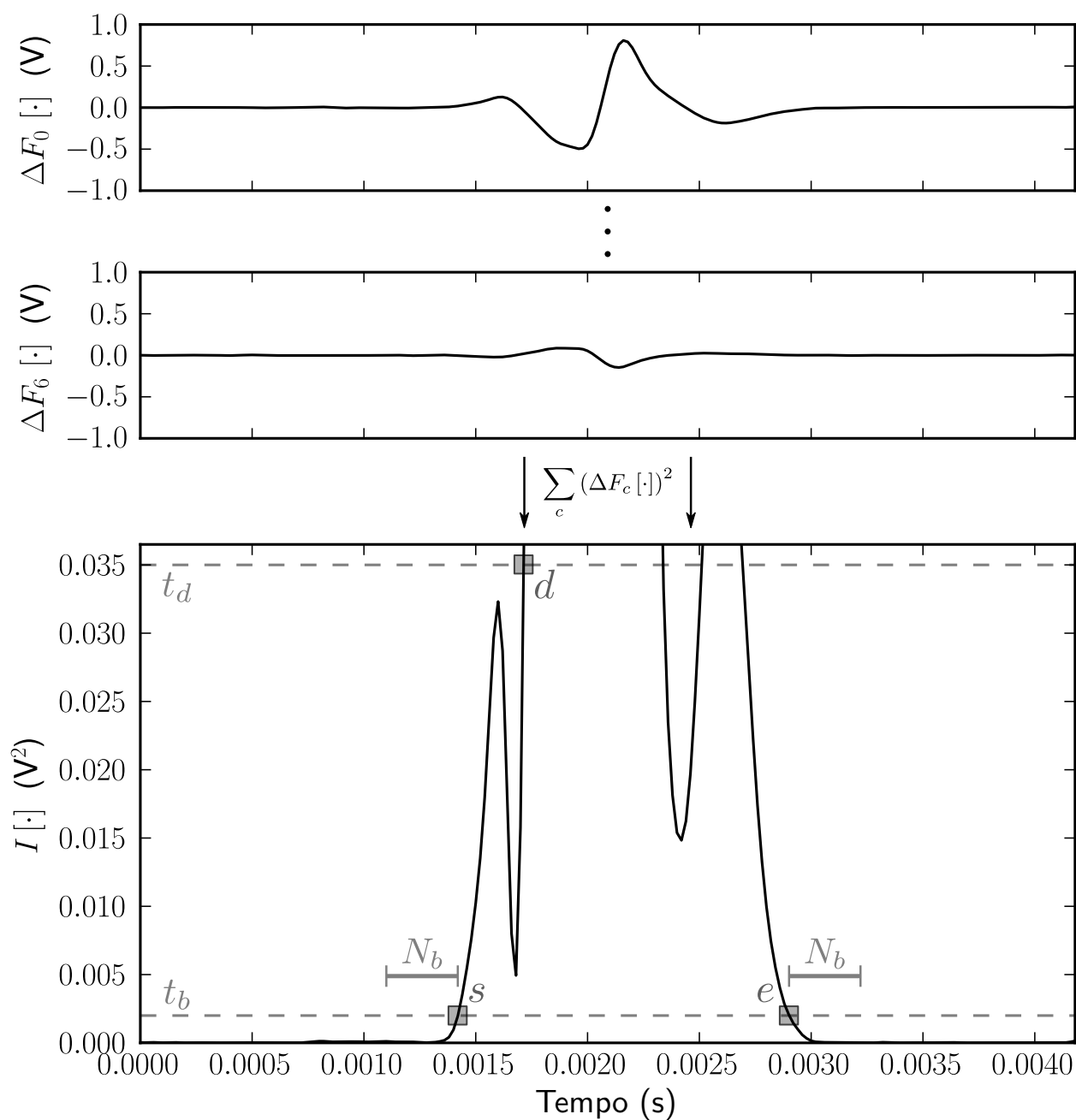


aquisição em *real-time*

Visão geral do algoritmo



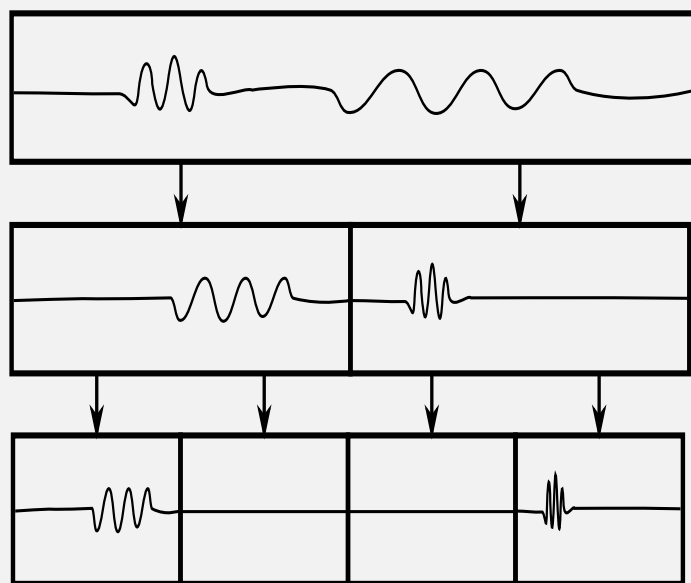
Segmentação



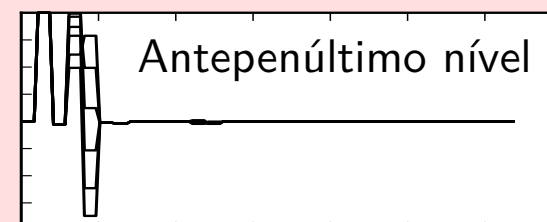
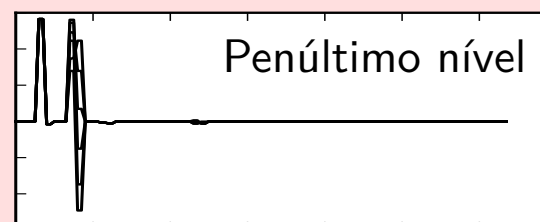
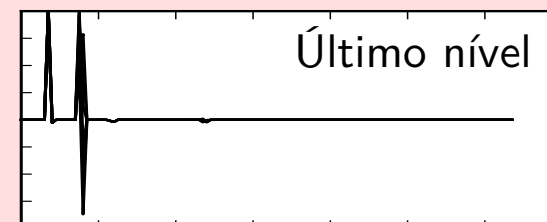
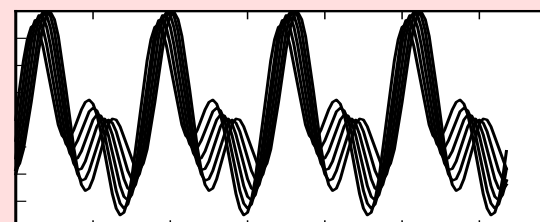
Extração de características

A transformada complexa de dupla árvore de pacote wavelet

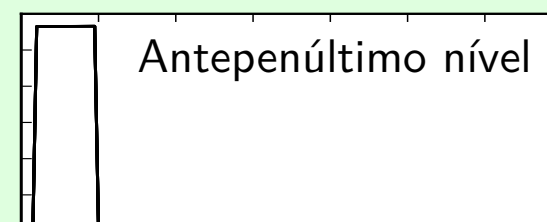
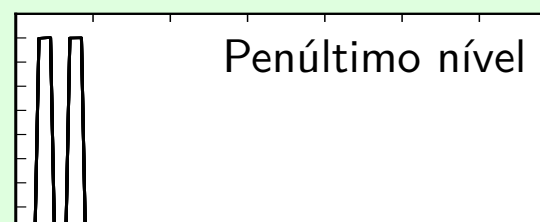
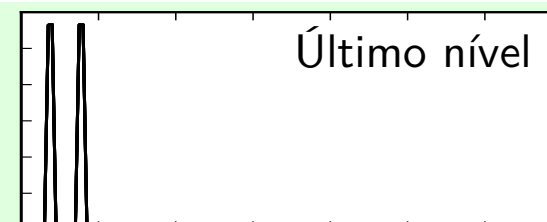
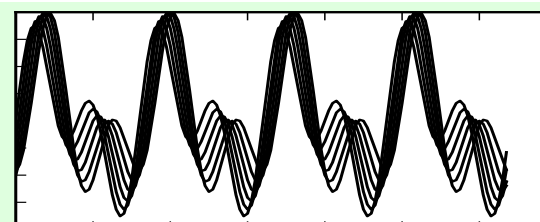
Transformada de
pacote wavelet



DWPT

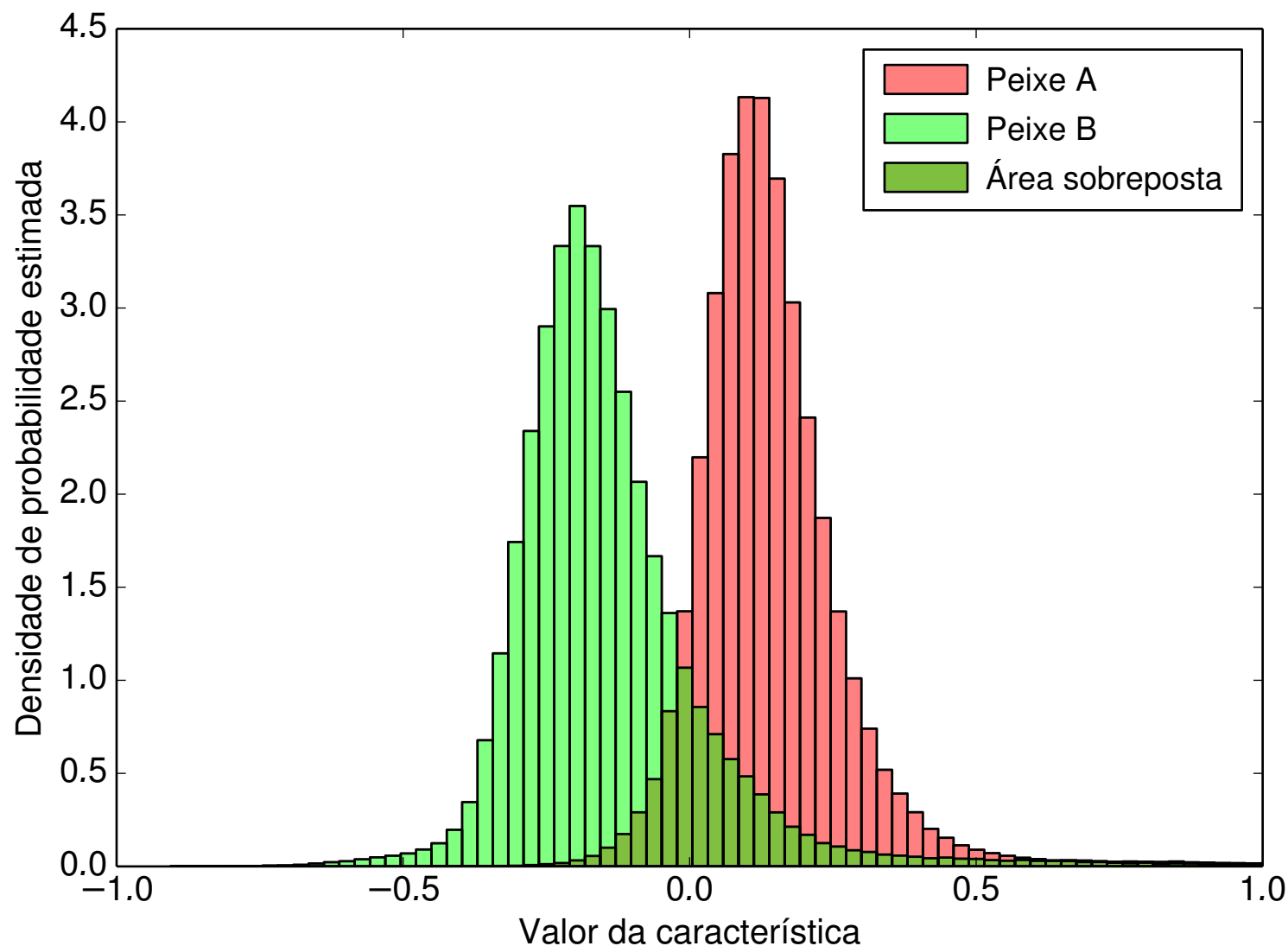


DT-CWPT



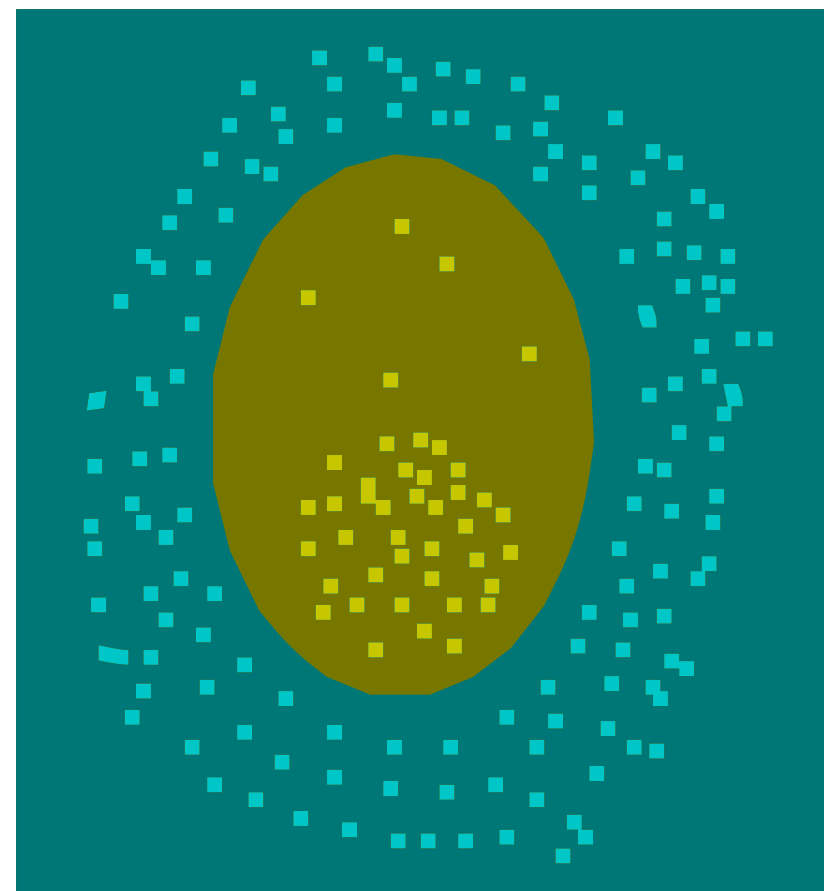
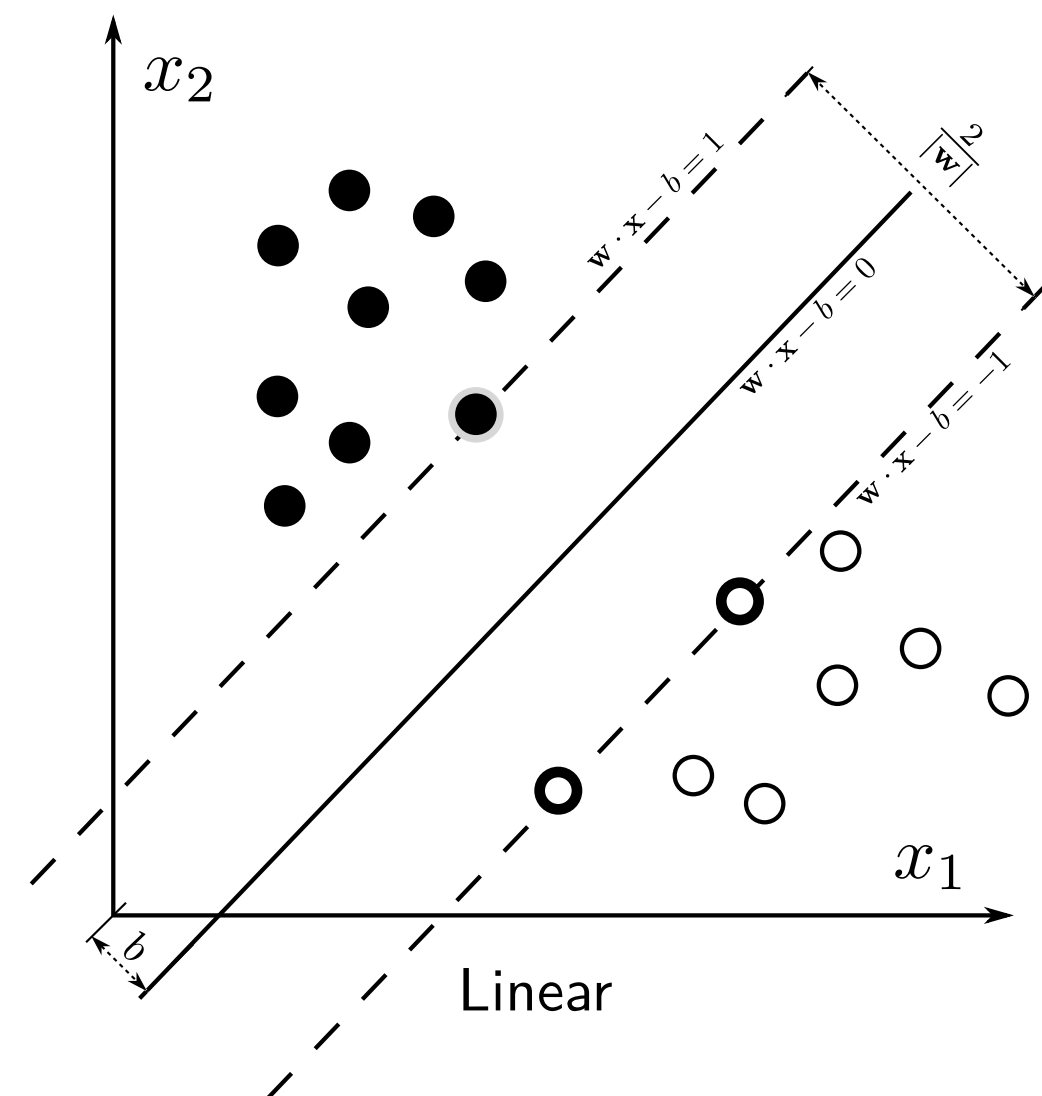
Seleção de características

Minimização da probabilidade de sobreposição



Classificação supervisionada

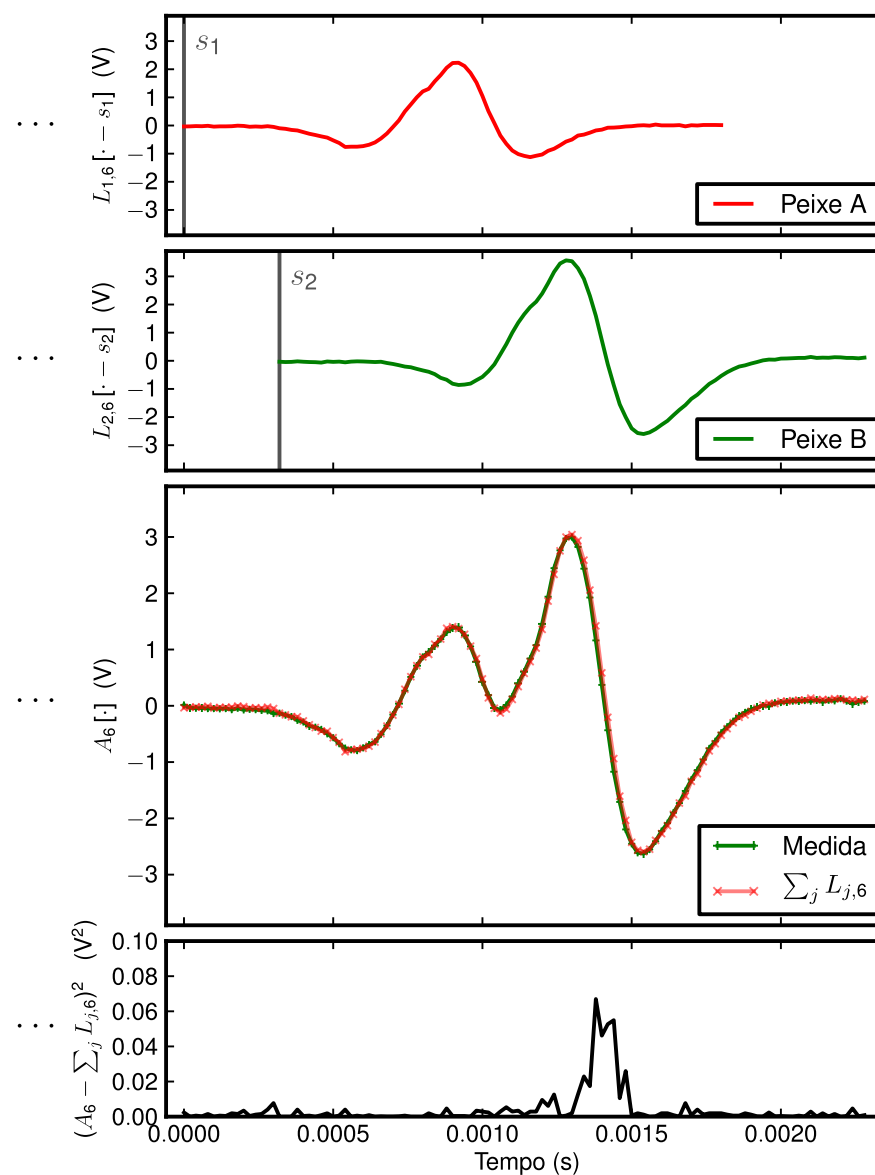
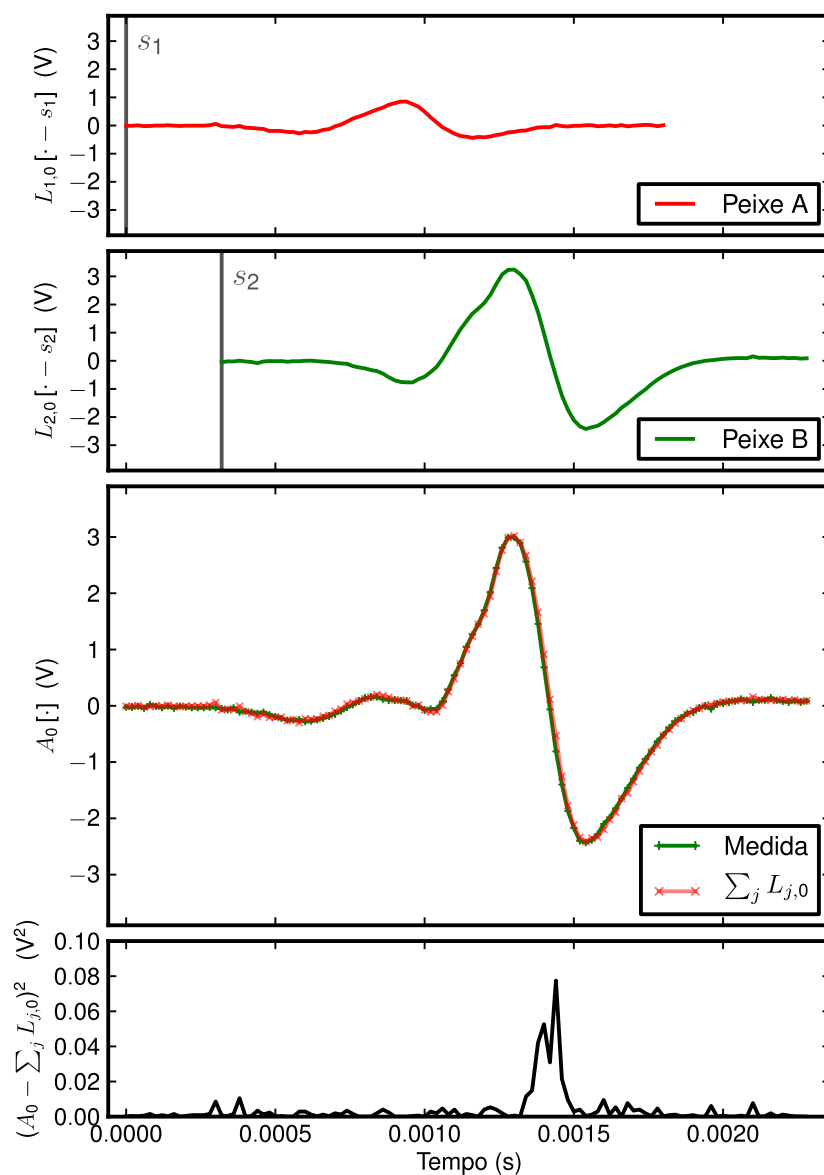
A máquina de vetores de suporte



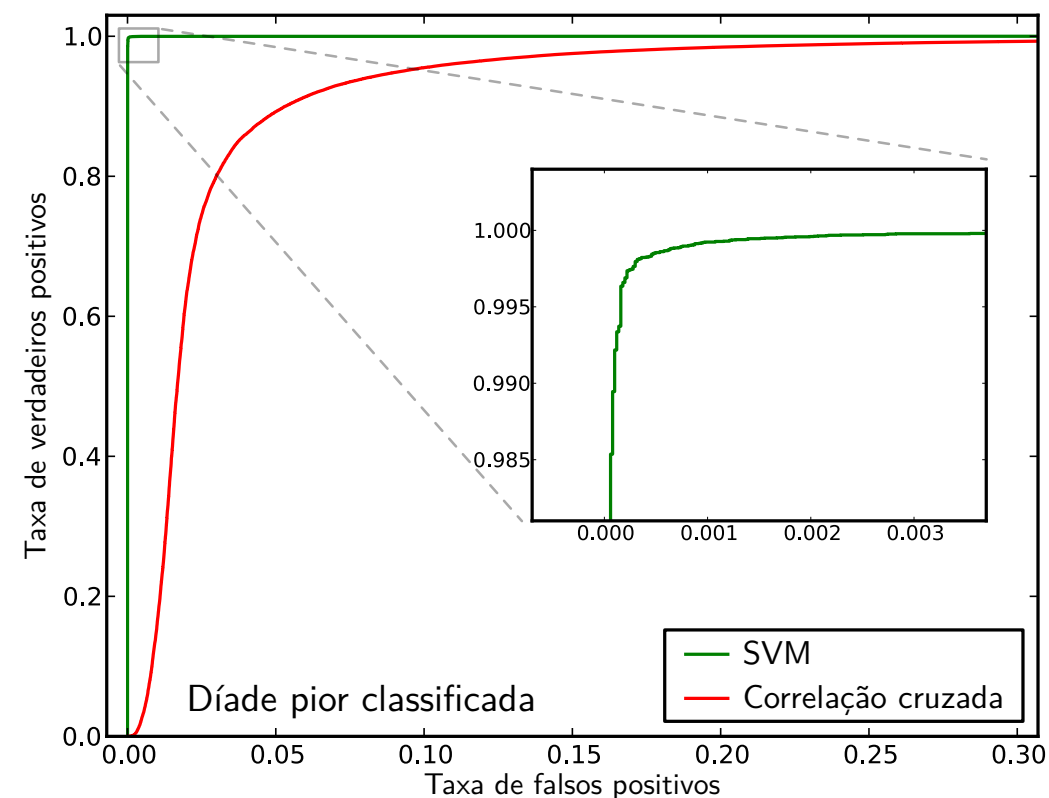
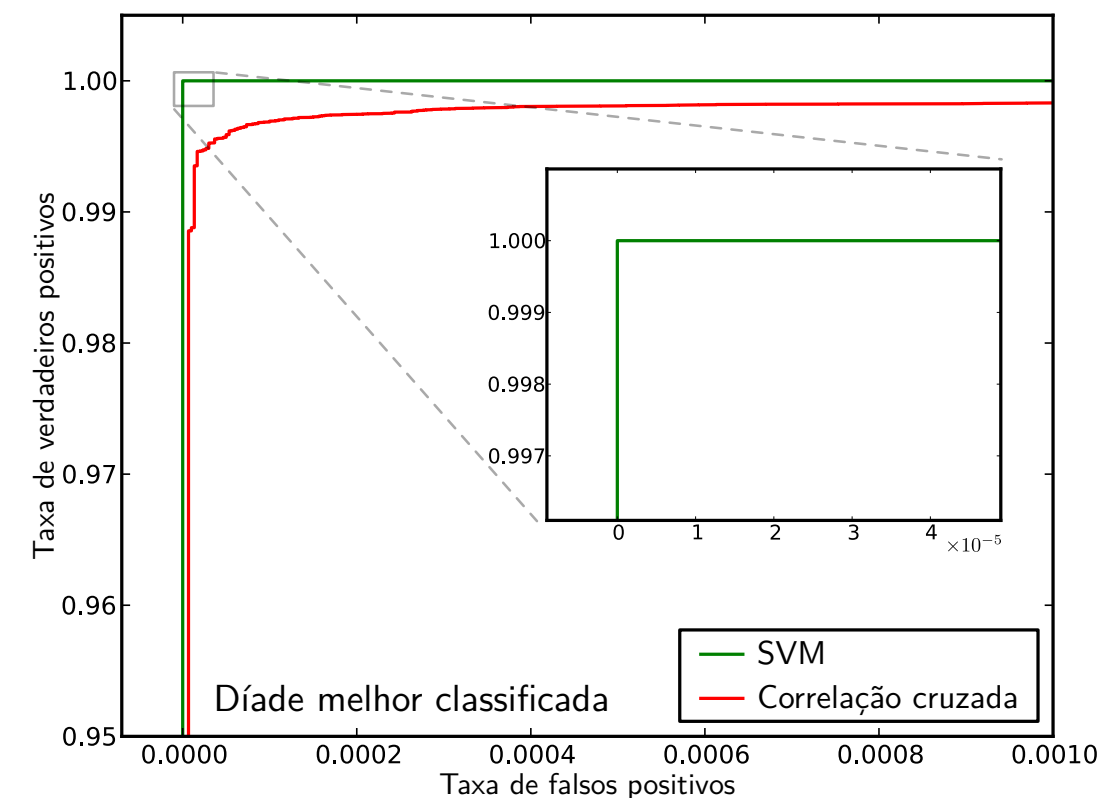
RBF

Condição de continuidade

$$\arg \min_{s_1, s_2} \sum_{i, c} (A_c[i] - \Xi(L_{1,c}[i - s_1] + L_{2,c}[i - s_2]))^2$$

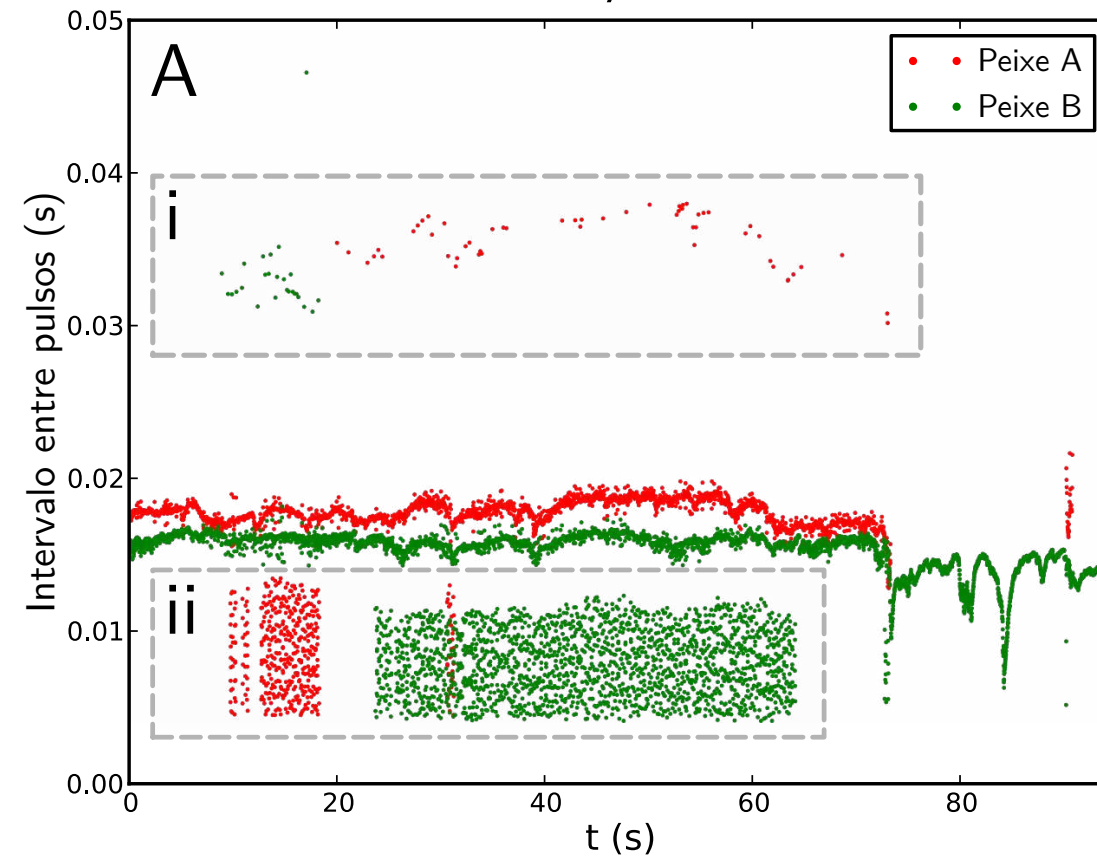


Acurácia do classificador

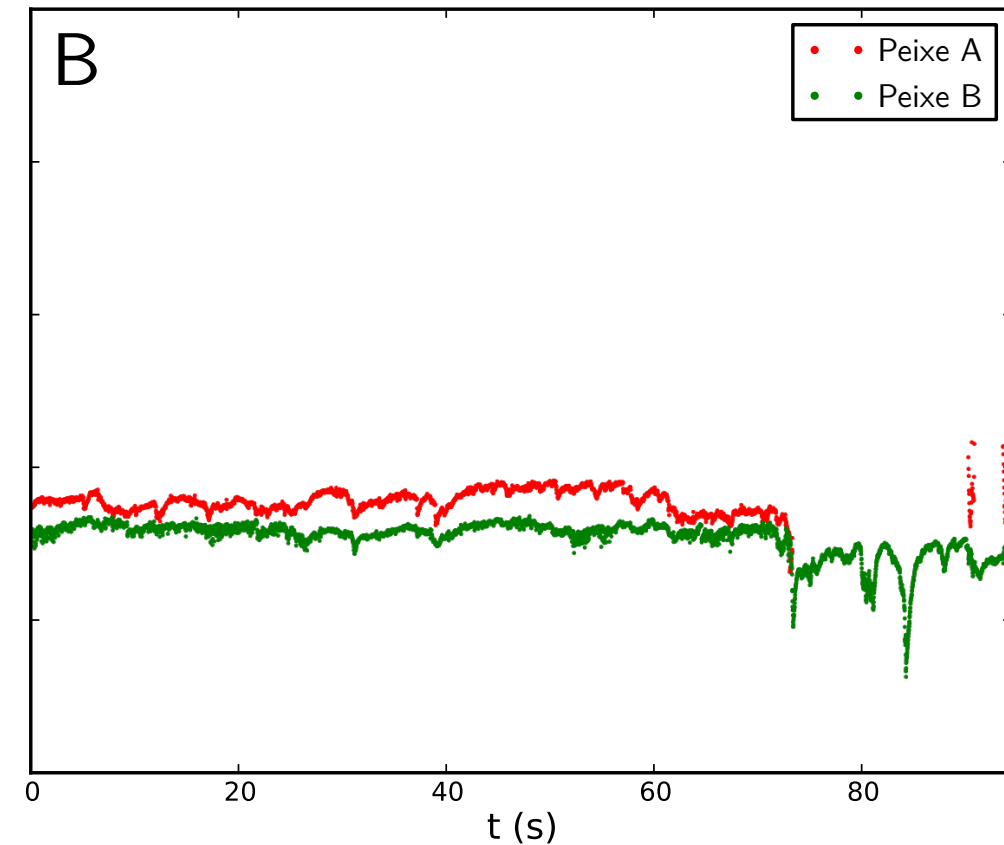


Intervalo entre pulsos

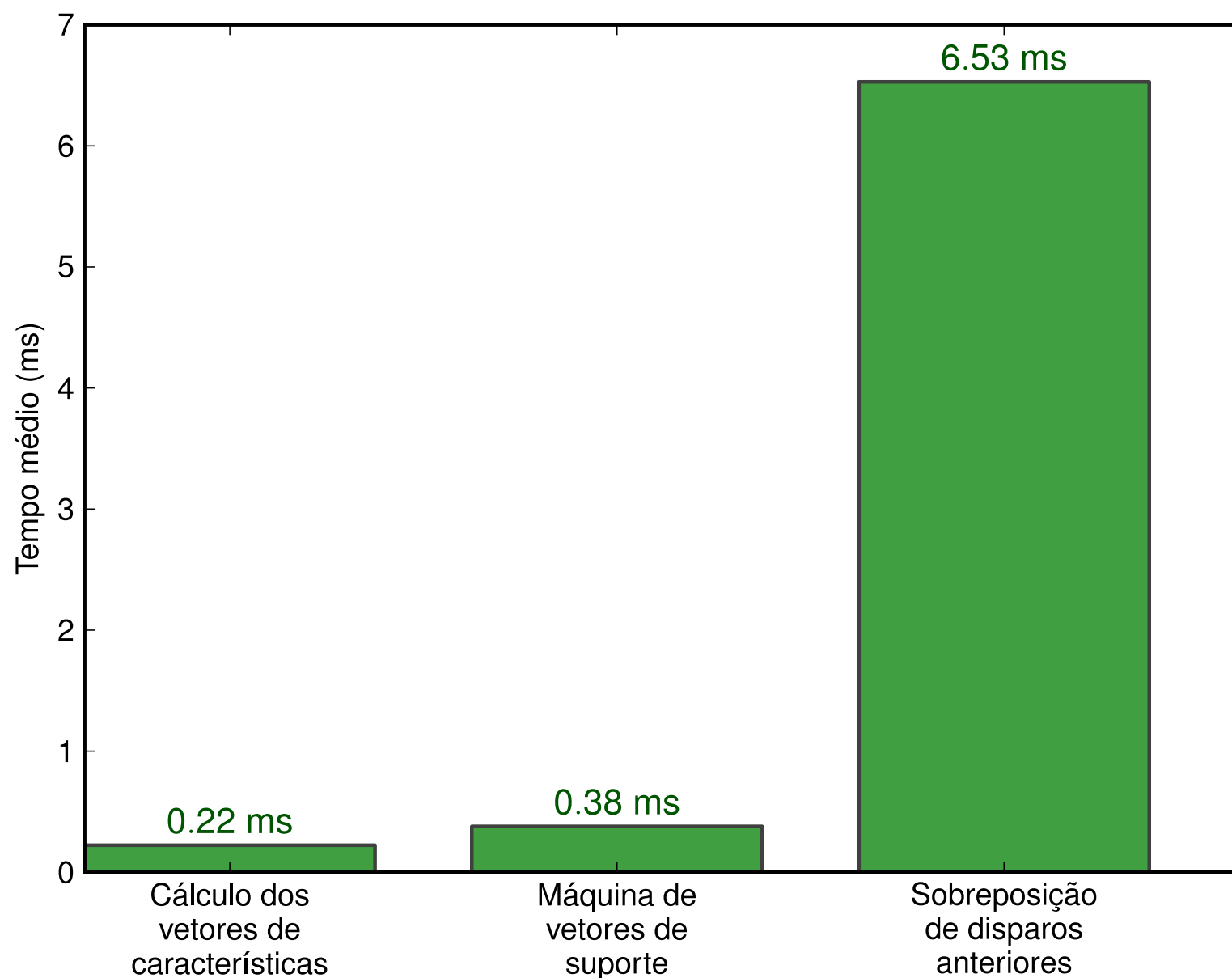
Método sem condição de continuidade



Método completo



Tempo de execução por etapa

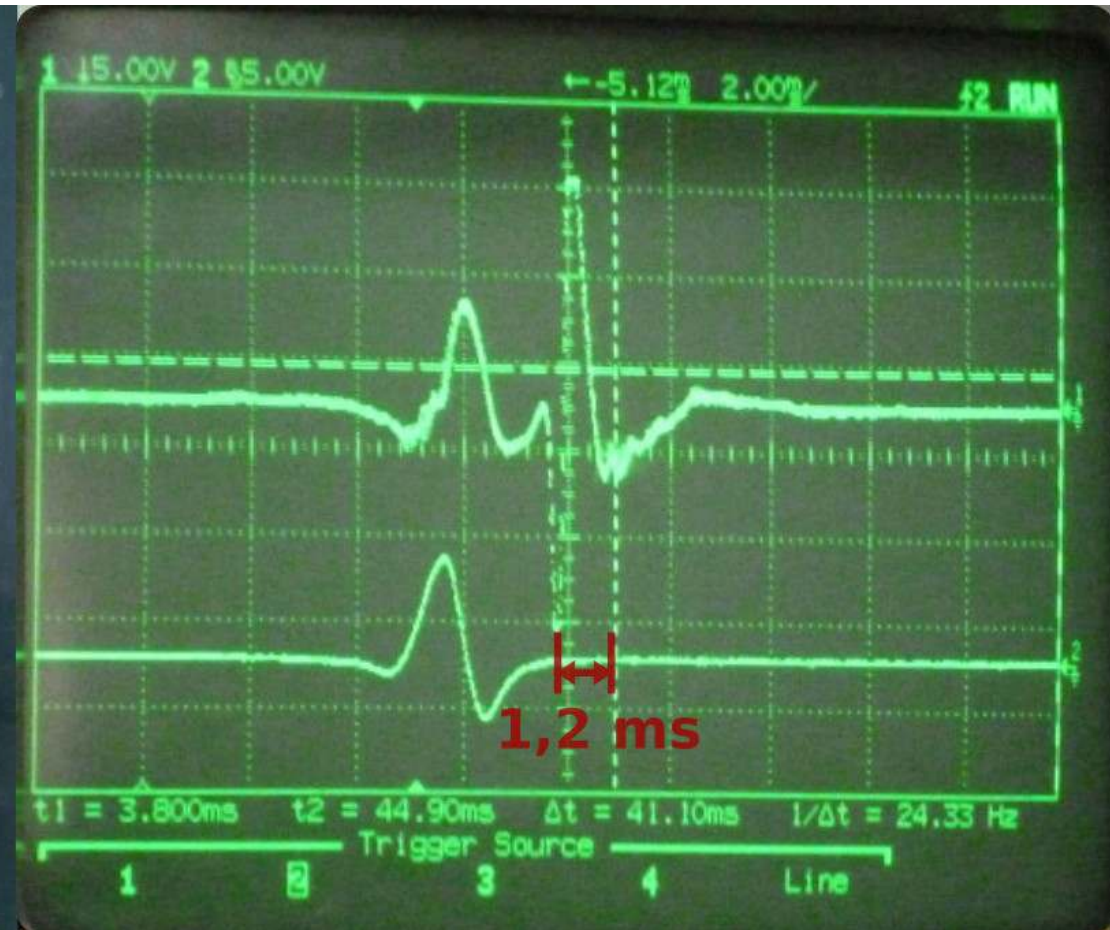


Tempos medidos em um Intel Core i3-2120 de 3,30 GHz. Dados de um aquário com 8 eletrodos (7 canais de medida).

Tempo de resposta do núcleo magnocelular

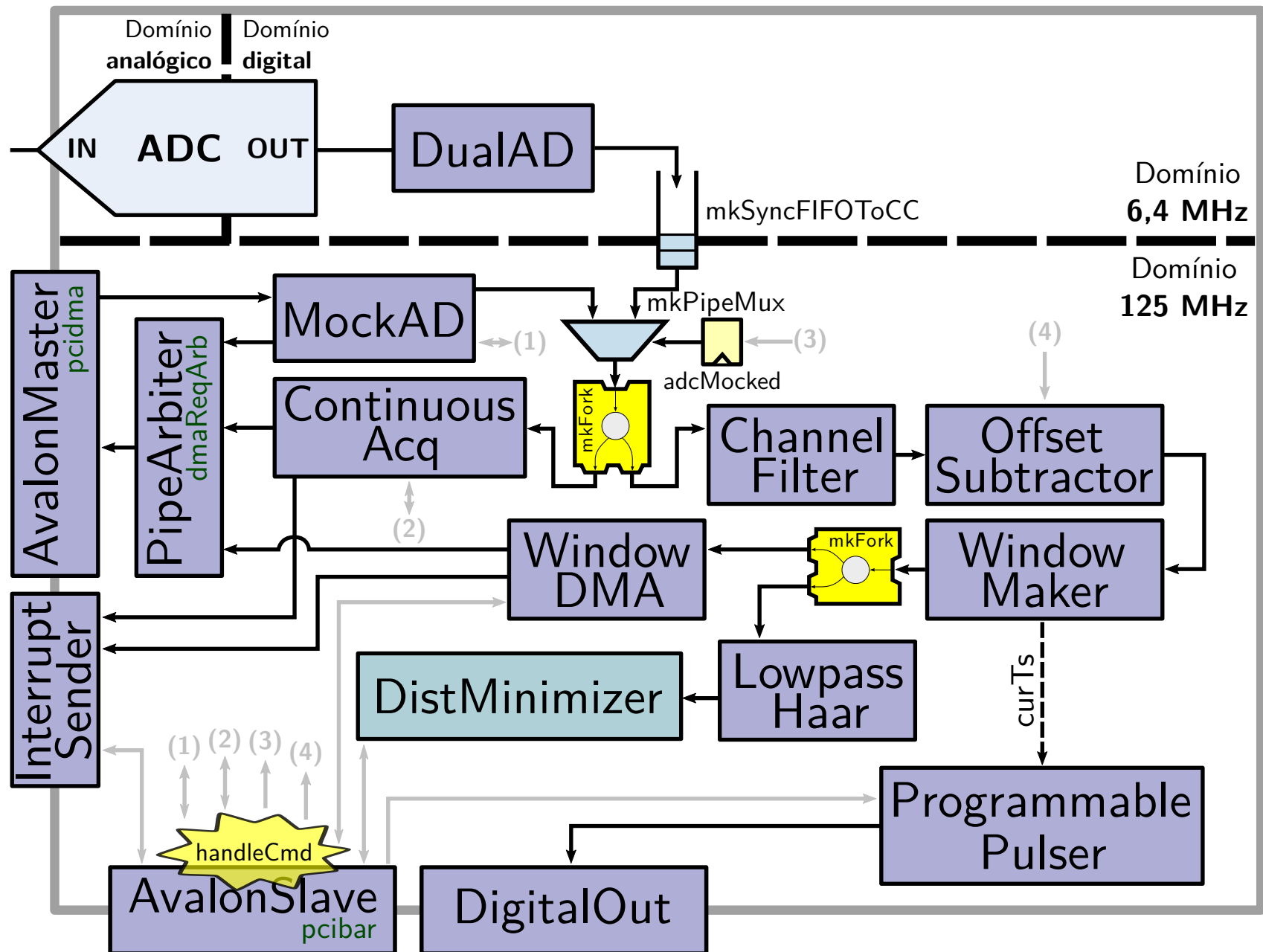


Medida com eletrodo extracelular

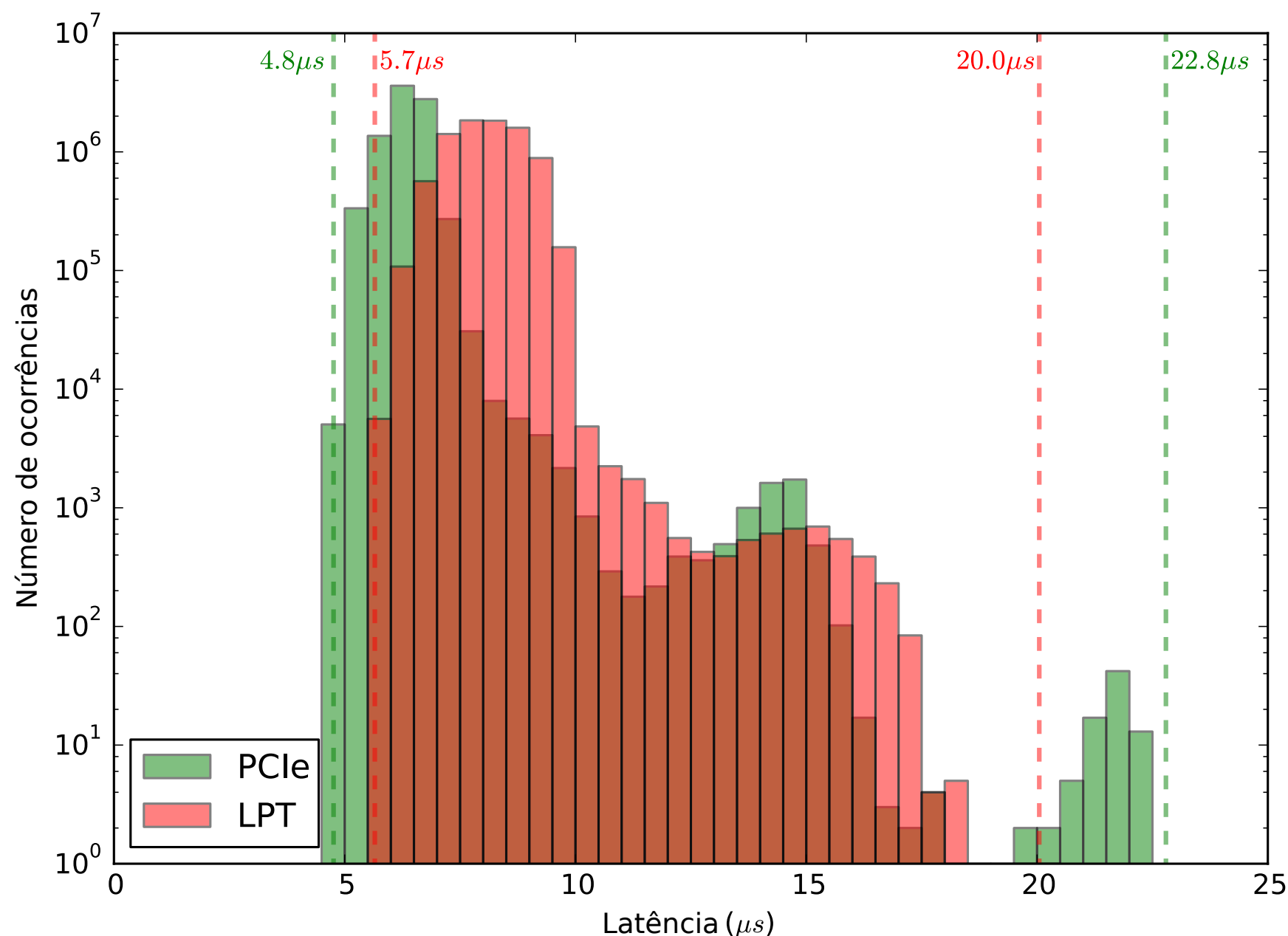


Acima: eletrodo. Abaixo: sinal na água.

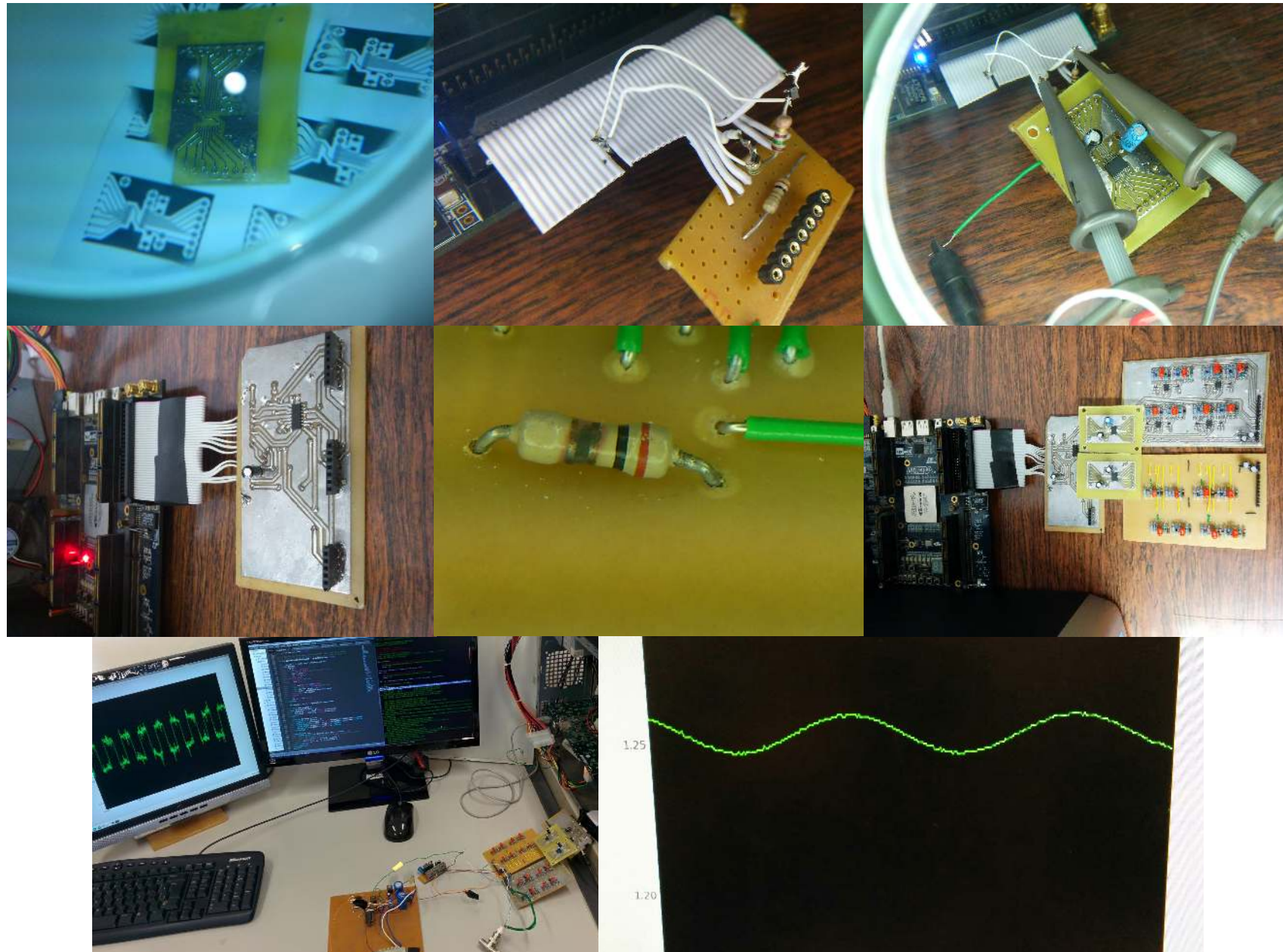
Visão geral do hardware



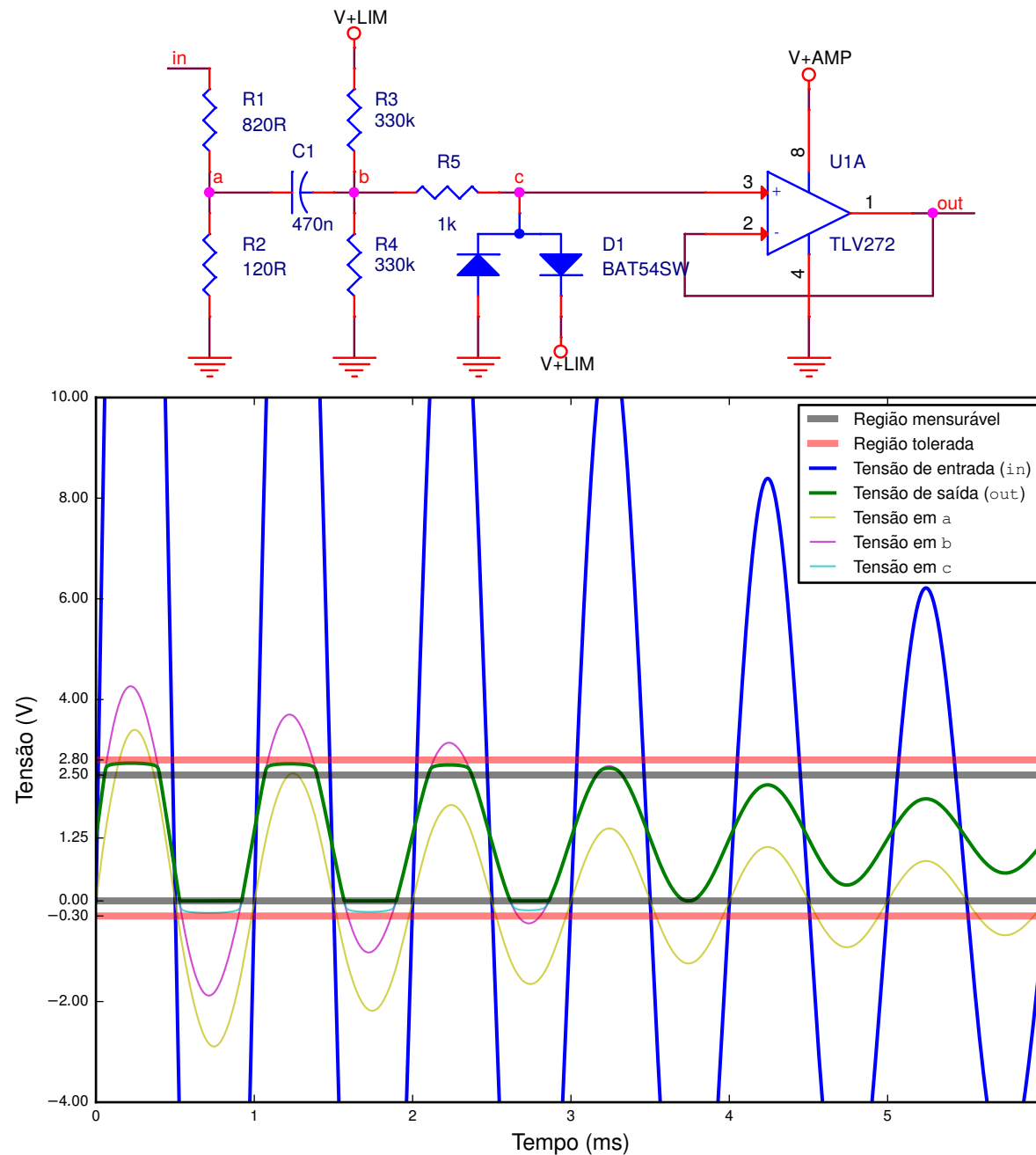
Caracterização da latência de interrupção do PCIe



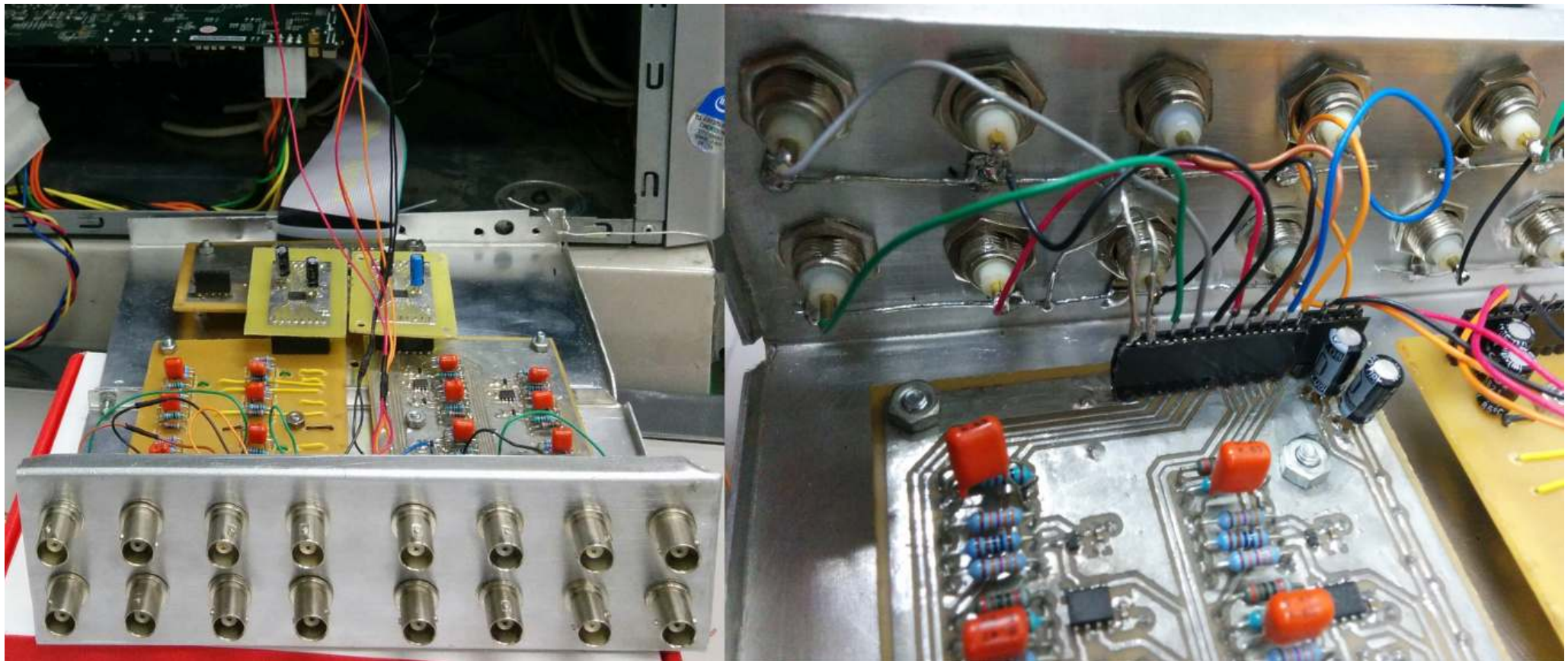
Construção do sistema de aquisição customizado



Front-end analógico



Sistema de aquisição customizado: montagem final



Infraestrutura de teste

Módulo mimetizador de AD

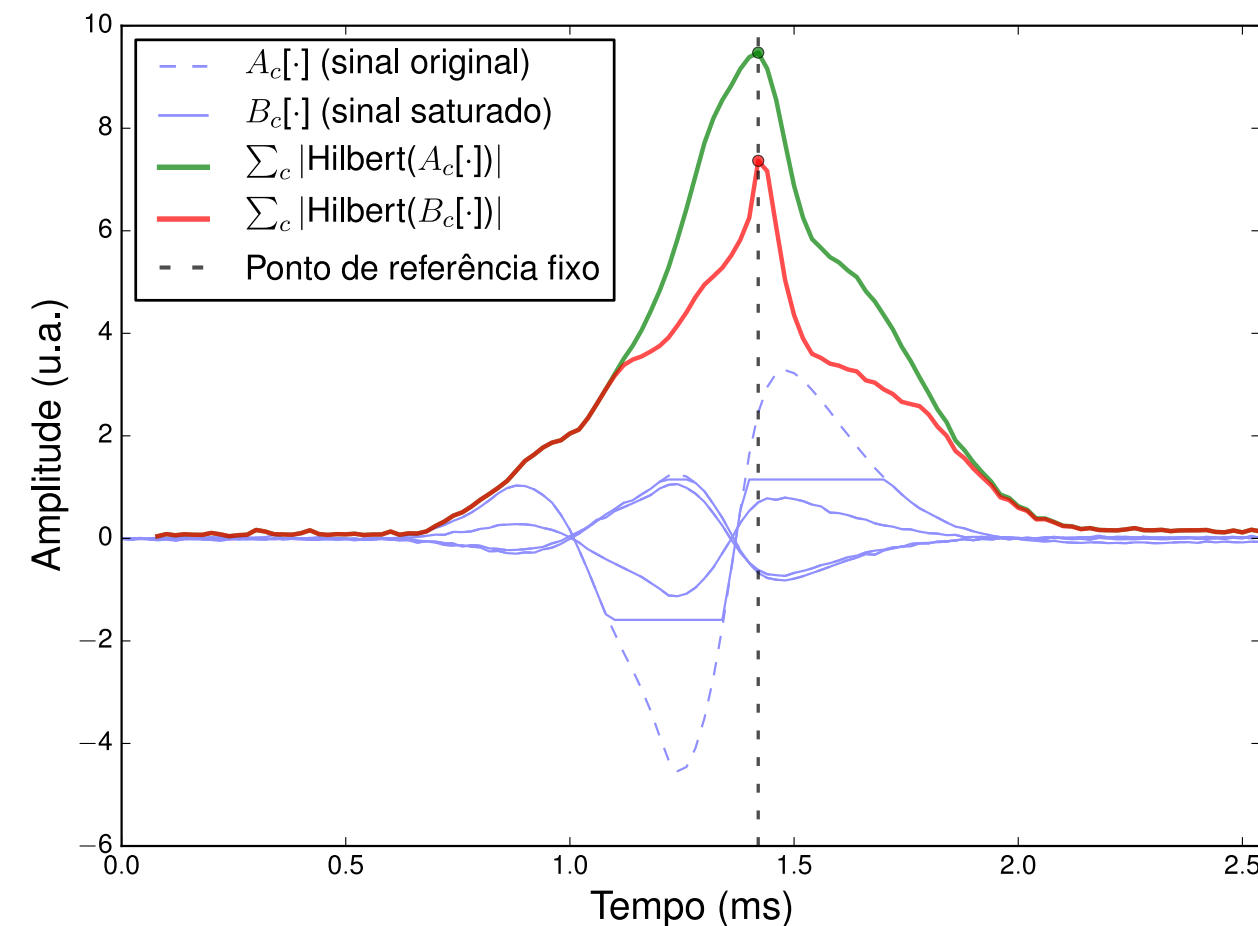
```
$ dd if=exp01.dma_in bs=65536 of=/dev/rtf1  
39936+0 registros de entrada  
39936+0 registros de saída  
2617245696 bytes (2,6 GB) copiados,  
155,756 s, 16,8 MB/s
```

Processa um arquivo previamente gravado
em um tempo $(10,3 \pm 0,8)$ vezes inferior
ao tempo de duração do experimento.

Módulo de aquisição contínua



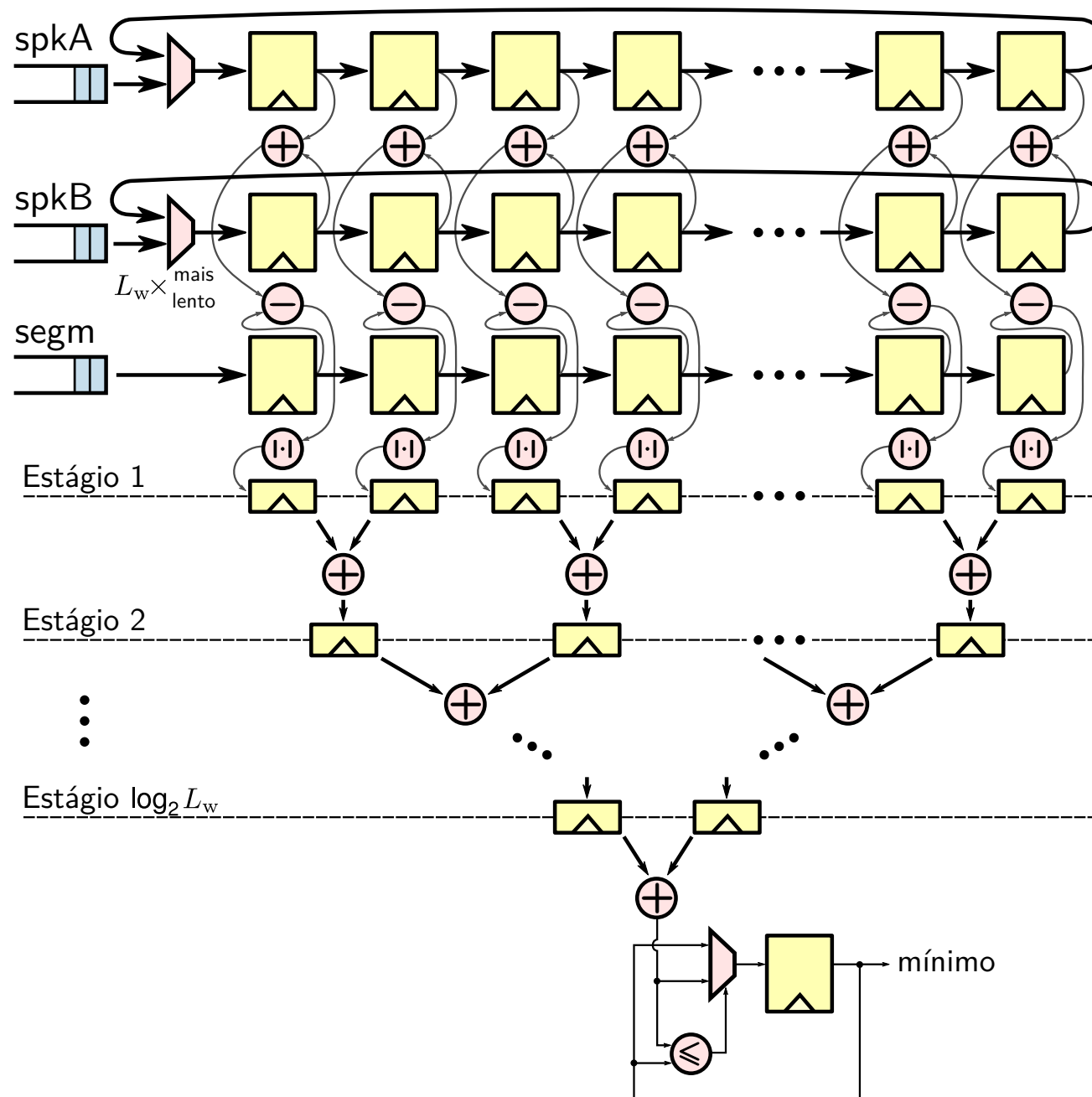
Módulo delimitador de janelas (segmentação)



Substituição da soma de quadrados pelo módulo da Transformada de Hilbert:

- Permite prever com antecedência em qual instante ocorrerá o fim da janela.
- Reduz a latência para começar a processar uma janela de sinal.

Módulo de sobreposição de disparos (continuidade)



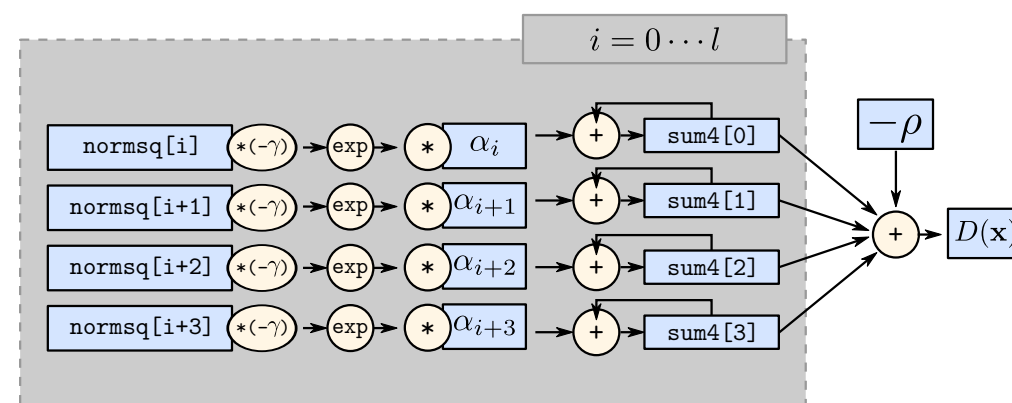
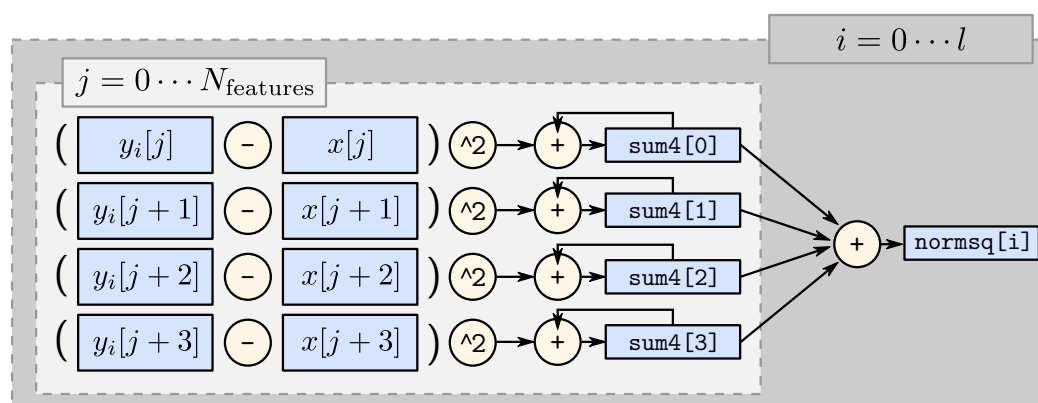
Software de tempo real: adaptações e otimizações

- Adaptação do RTAI para uso de instruções AVX: substituição da instrução `fxsave` por `xsave`.
- Introdução de *array* com *wrap-around* precomputado para vetorização da transformada wavelet:

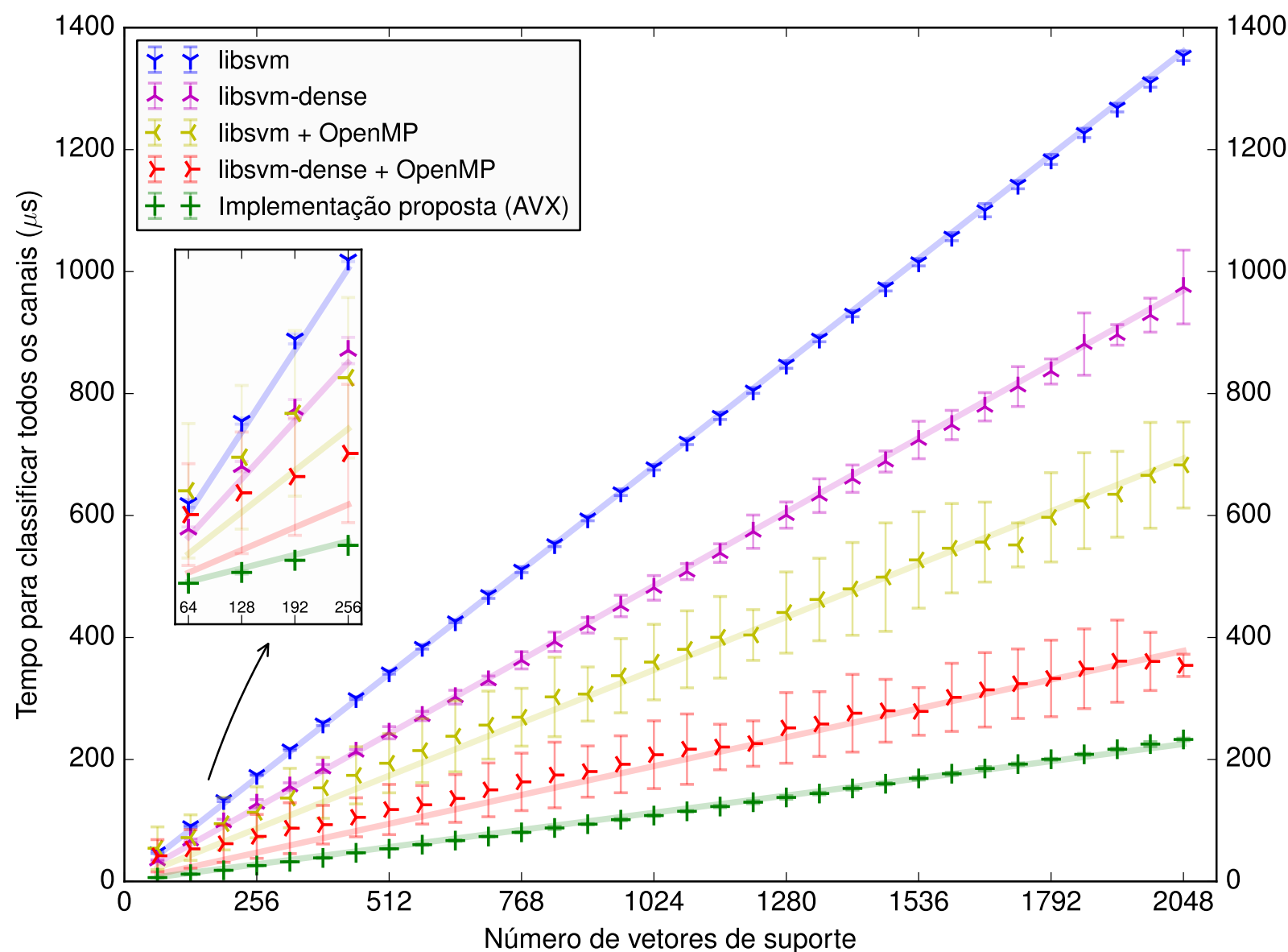
$$\text{extin}[i] := \text{in}[i \ \& \ (n-1)], \quad i \in [0, \text{off}+n+n\text{coef})$$

- Otimização manual do classificador SVM com núcleo RBF:

$$D(\mathbf{x}) = -\rho + \sum_{i=0}^l \alpha_i \exp(-\gamma \underbrace{\|\mathbf{y}_i - \mathbf{x}\|^2}_{\text{normsq}[i]})$$



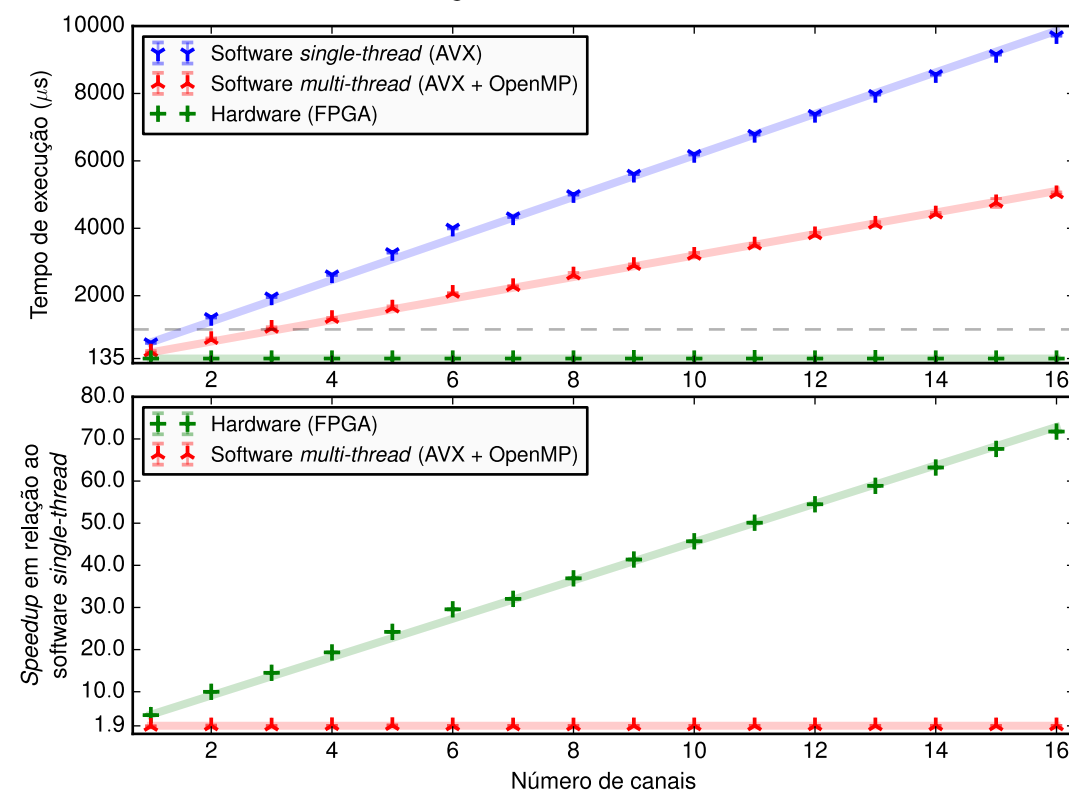
Desempenho da implementação de SVM proposta



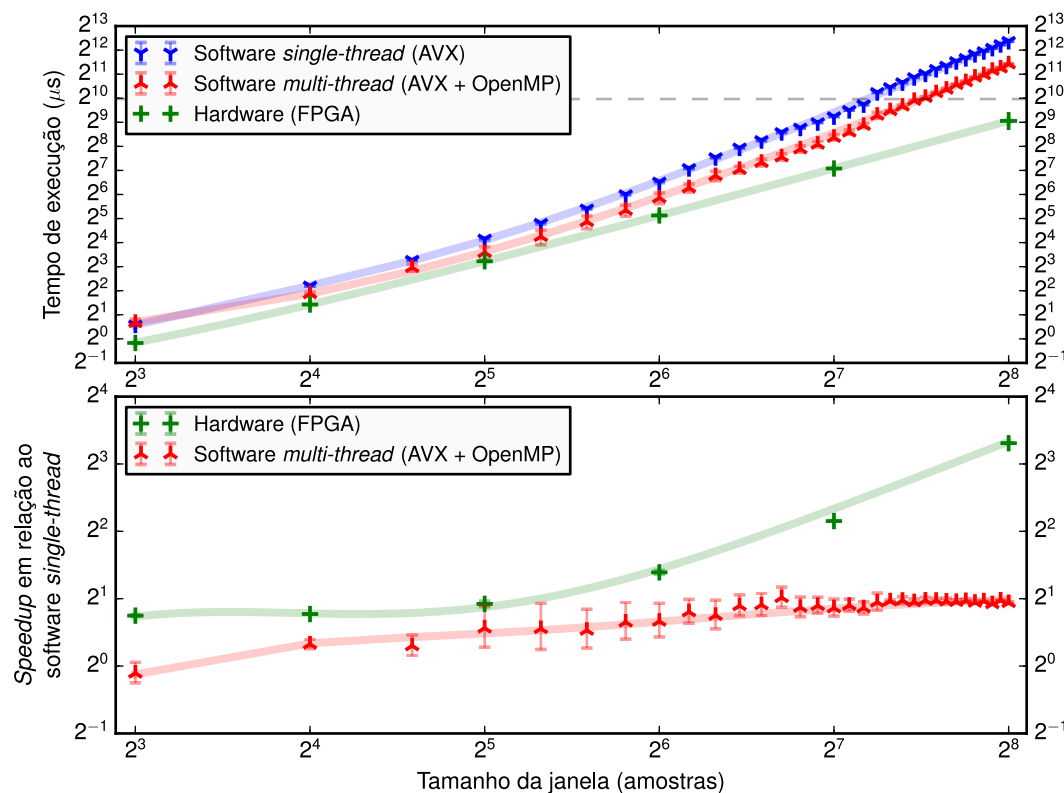
Tempos medidos em um Intel Core i3-2120 de 3,30 GHz. Dados de um aquário com 12 eletrodos (11 canais de medida).

Desempenho do módulo de sobreposição de disparos

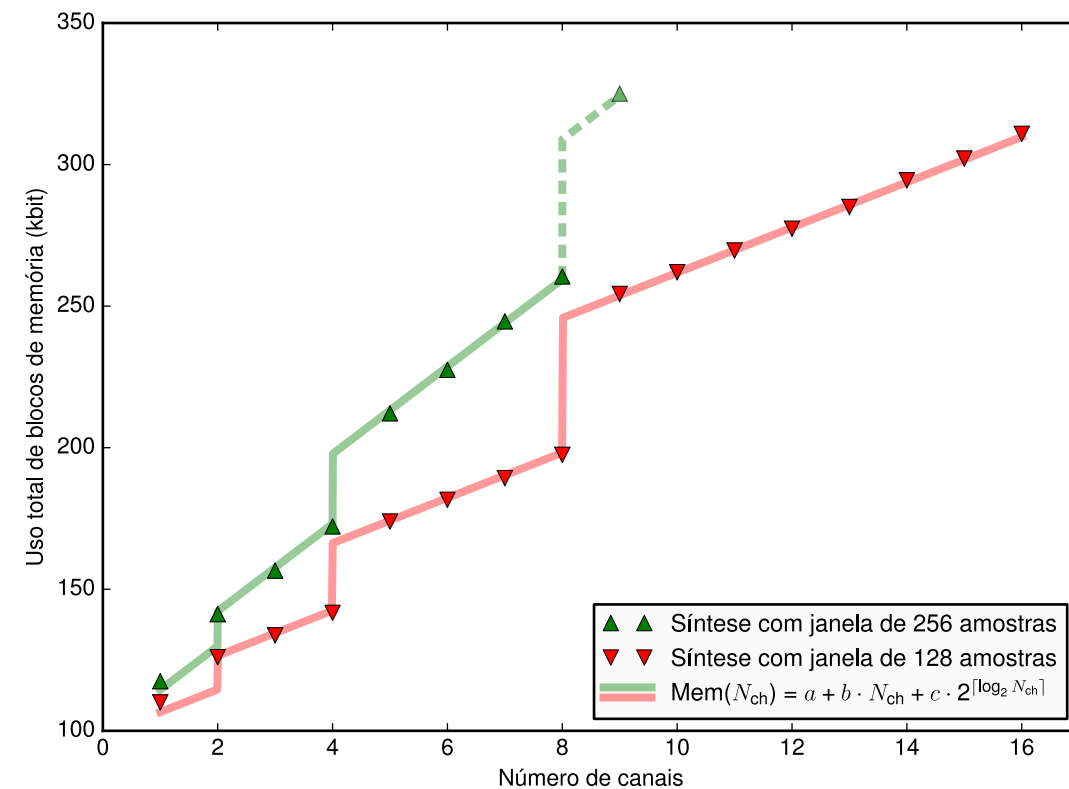
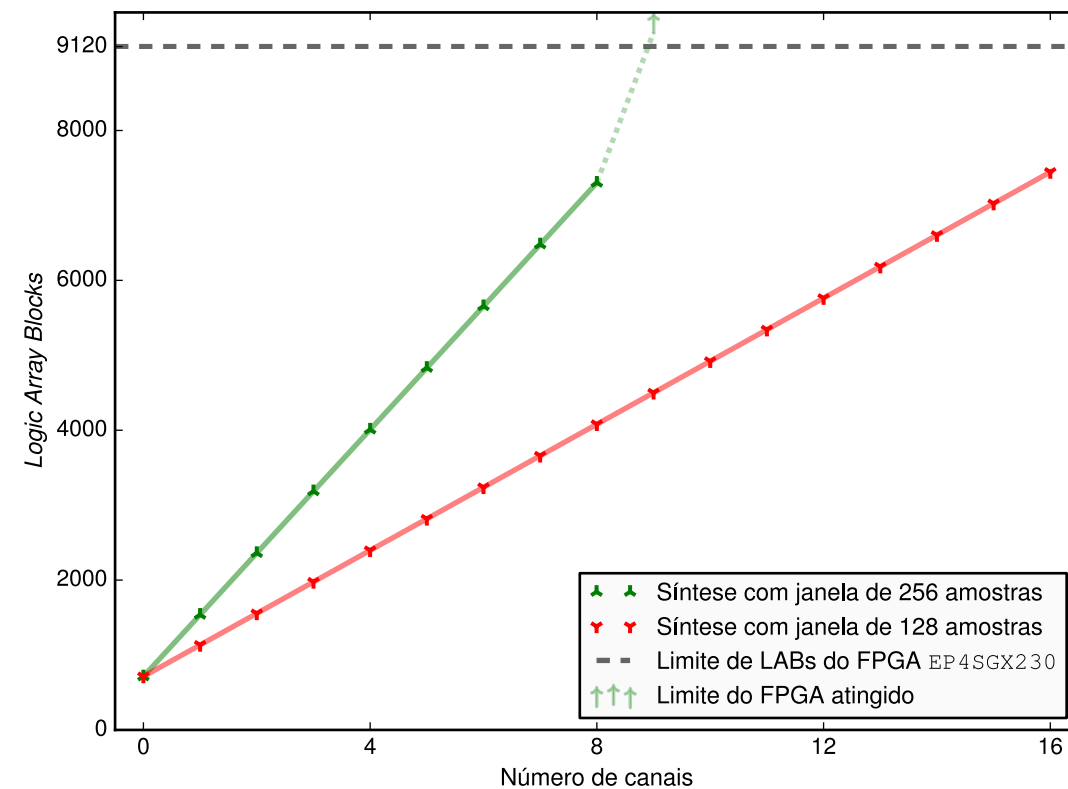
Fixando janela de 128 amostras



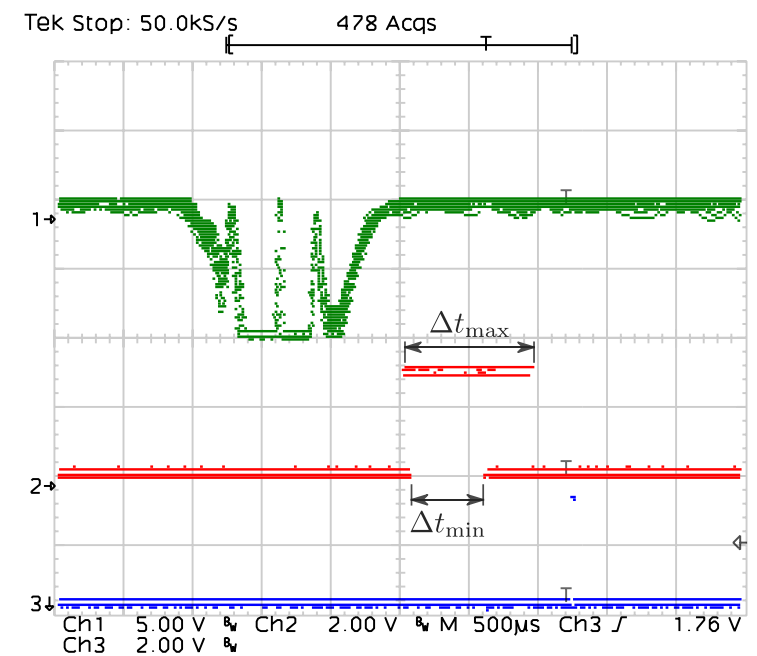
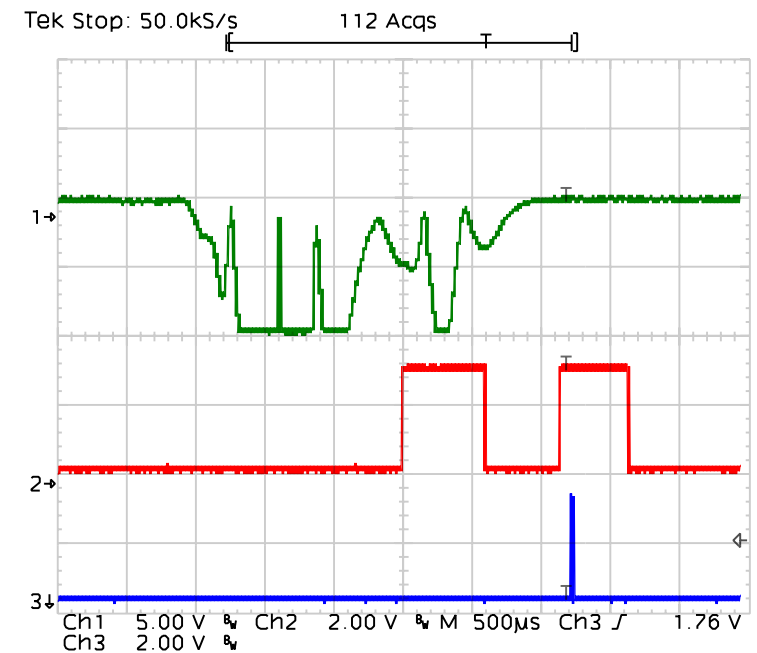
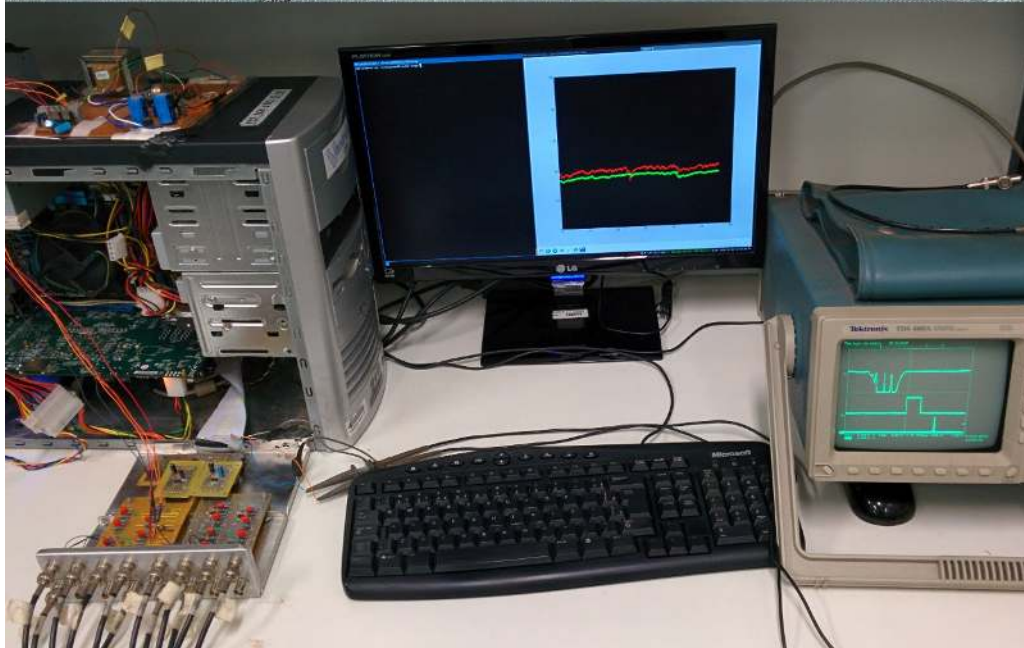
Fixando 1 canal



Recursos de hardware consumidos



Aferição da latência total do sistema



Conclusões

- Este trabalho define o estado da arte atual em:
 - Classificação do peixe de origem de uma descarga de órgão elétrico (DOE).
 - Instrumentação para detecção dessas DOEs em tempo real.
- Esta instrumentação permitirá a realização, pela primeira vez, de experimentos envolvendo o estudo comparado da resposta de dois indivíduos a estímulos dependentes da atividade elétrica destes.
- Devido ao alto grau de complexidade computacional e aos requisitos de tempo real inerentes a este problema, o uso das modernas técnicas de co-projeto hardware/software aqui empregadas (com FPGA e RTOS) foi crucial para a conclusão do projeto. A aplicação dessas técnicas é inédita em problemas de neuroetologia.