

Folha de rosto

Projeto: Detecção de cavitação em sonotrombólise cardíaco: pesquisa de alternativas

Pesquisador responsável: Sérgio Shiguemi Furuie

Instituição: Escola Politécnica da USP

Processo: 2021/04814-9

Vigência: 01/10/21-30/9/23

Período deste relatório: 01/10/22-10/7/23 (para pedido de prorrogação)

Equipe:

Nome/cargo/Formação	Função no projeto	Horas/semana
Sérgio S Furuie Prof EPUSP Eng. Eletrônica, ITA 1977; MSc (COPPE, 1980), DSc (EPUSP, 1990)	Coordenador do projeto e pesquisador. Pesquisa em modelos, processamento de sinais e otimização de processos. Métodos de detecção. Avaliação dos resultados.	15
Vitor Gabriel Barra Souza Doutorando (DD) Bolsa FAPESP 2020/10819-0 Medicina, UFJF, 2017	Pesquisa do fenômeno e desenvolvimento de modelos matemáticos de cavitação em biologia. Efeitos biológicos, aprimoramento de modelos. Desenvolvimento, implementação e testes de modelos.	40
Wilton Ruas da Silva Doutorando (DD) FAPESP 2020/16024-0 Eng. Eletrônica, ITA, 1986	Pesquisa e desenvolvimento de equipamento com sistemas de retroalimentação e segurança para sonotrombólise. Avaliação.	40
Roberto Costa Ceccato Doutorando (DD) FAPESP 2021/13997-0 Eng Elet, EPUSP, 2022	Pesquisa e desenvolvimento de detectores de cavitação por processamento de sinais. Desenvolvimento de plataformas computacionais para simulação e avaliação numérica. Avaliação preliminar em cuba acústica.	40
Patricia Akemi Sekini Guenkawa Mestranda Bolsa institucional PPGEE/EPUSP Eng Mec, EPUSP, 2021	Pesquisa e desenvolvimento de detector de cavitação via rede neural. Desenvolvimento de plataformas computacionais para treinamento da rede neural e avaliação numérica. Avaliação preliminar em cuba acústica.	40

Sérgio S Furuie

Sumário

Resumo do projeto original	4
Resumo das atividades desenvolvidas no período anterior (relatório I)	4
Resumo das atividades desenvolvidas no período deste relatório.....	5
1. Introdução	6
Visão geral do projeto e sua relação com a sonotrombólise	6
2. Metodologia (continuação do relatório I)	8
Formulação do problema	8
Geometria e sistema de coordenadas para a sonotrombólise	8
Espectro do sinal	8
Manifestação das cavitações no espectro dos sinais recebidos	8
Simulando as cavitações estáveis em resposta ao estímulo.....	9
Recepção de cavitação estável ruidoso com transdutores de banda estreita	10
Simulando as cavitações iniciais em resposta ao estímulo	10
Recepção da cavitação inercial com transdutores de banda larga.....	11
Recepção da cavitação inercial ruidosa com transdutores de banda estreita	11
Simulando combinação de eco, cavitação estável e inercial em resposta ao estímulo	12
Sinal emitido de fonte misto equalizado em energia	12
Recepção de sinal misto equalizado ruidoso: transdutores de banda estreita	12
Sinal coerente obtido diretamente no domínio da frequência	13
3. Deteção de eventos: aspectos gerais.....	14
Medidas para as deteções: SNR	15
Amplitude mínima detectável da cavitação para um nível de ruído	17
Procedimentos para avaliação da detecção.....	19
Geração do conjunto de sinais para análise da detectabilidade	19
Programas para a avaliação dos detectores	19
Verificação prática do valor de Kmin.....	21
4. Deteção de eventos com receptor de banda estreita.....	22
Características do receptor de banda estreita	22
Características dos sinais.....	22
Características das medidas	23
Estimativa do limiar para cada banda (SNR_thresh): receptores de banda estreita.....	23
Efeito do eco no SNR das demais faixas: receptor de banda estreita.....	24
Critérios para detectar cavitação estável: receptor de banda estreita	25
Critérios para detectar cavitação inercial: receptor de banda estreita	26

Determinação do Kmin e Imin: receptor de banda estreita	28
Geração de banco de sinais para avaliação: receptor de banda estreita	28
Avaliação dos detetores: receptores de banda estreita	28
Alternativa: critério 4.03.18 para banda estreita.....	30
5. Deteção de eventos com receptores de banda larga.....	32
Características do receptor de banda larga	32
Características dos sinais e das medidas.....	32
Estimativa do limiar de SNR para cada banda: receptores de banda larga	32
Deteção com critério 4.03.18 para banda larga.....	33
6. Pesquisa para driblar ossos	36
7. Conclusão e discussão	37
8. Referências	38
9. Descrição e avaliação do apoio institucional recebido no período.....	39
10. Plano de atividades realizadas no período.....	39
11. Descrição sucinta e justificada da aplicação dos recursos	40
Utilização dos Recursos da Reserva Técnica no período	40
Utilização dos Recursos de Benefícios Complementares no período corrente	40
12. Lista de produção no ano 2 relacionada ao projeto.....	40
Trabalhos em revistas.....	40
Trabalhos em conferências	40
Orientações de Pós-graduação relacionados ao projeto	40
13. Anexos: cópias de trabalhos apresentados.....	41
14. Apêndices	42
Plano de gestão de dados.....	42
Projeto e dados.....	42
Visão geral do programa mainSonoTrombolise.m.....	42
Requisitos/Instruções para rodar o programa	44

Resumo do projeto original

A maioria das mortes por infarto agudo do miocárdio ocorre fora do ambiente hospitalar. Neste contexto, uma proposta recente chamada sonotrombólise cardíaco com microbolhas tem potencial para promover melhorias significativas no tratamento do paciente. No entanto, é muito importante que o principal fenômeno envolvido na trombólise – cavitação de microbolhas – seja controlado para evitar danos ao paciente.

O ultrassom é considerado muito promissor no tratamento de tromboses agudas e crônicas, pois pode ser aplicado externamente, não é ionizante e pode ser reaplicado diversas vezes.

A cavitação por ultrassom cria forças de cisalhamento capazes de dissolver trombos microvasculares e epicárdicas podendo beneficiar os pacientes de casos agudos e crônicos. Têm sido notadas melhorias significativas na circulação coronariana epicárdica e na microcirculação.

Desse modo, o desenvolvimento de um equipamento portátil, mais simples e de fácil uso para a sonotrombólise pode ampliar o acesso a este procedimento e é objeto de uma pesquisa em andamento. O protótipo desta pesquisa não terá a visualização modo-B de ultrassom, pois destina-se a atendimento de urgência sem a necessidade de especialista em imagens. Contudo, uma simples replicação do protocolo testado clinicamente em um equipamento portátil pode não ser a mais eficiente e a mais segura.

Dentre as várias dificuldades do desenvolvimento do protótipo, pode-se antecipar: a) ocorrência de regiões com intensidades acima do desejado podendo ocasionar danos; b) regiões sub-expostas por conta de atenuações; c) aquecimento indesejado; d) subconjunto de transdutores pouco efetivos para determinados focos, desperdiçando energia.

O objetivo desta proposta é investigar mecanismos eficientes de segurança, principalmente a detecção alternativa da cavitação e o controle realimentado das intensidades de pressão, visando equipamentos mais seguros ao paciente.

A metodologia consistirá em estudos teóricos e simulação da cavitação e da sua detecção via transdutores convencionais da sonotrombólise. Pretende-se também realizar avaliações conceituais em cuba acústica. Não faz parte do escopo deste projeto a avaliação em animais ou pacientes.

Resumo das atividades desenvolvidas no período anterior (relatório I)

As atividades se concentraram na modelagem dos sinais de eco e cavitação para o caso de transdutores de banda estreita, bem como na simulação dos sinais e na estimativa dos sinais emitidos pelos espalhadores. A estimativa das fontes foi baseada em múltiplos sensores distribuídos com a sincronização dos sinais recebidos (sinal coerente). Foi desenvolvida a parte teórica para o cálculo da relação sinal/ruído por banda no domínio da frequência, bem como da estimativa do ruído. Em resumo, foi criada a infraestrutura computacional para a análise espectral dos sinais reconstruídos em relação ao nível de ruído.

Resumo das atividades desenvolvidas no período deste relatório

No período corrente foram implementadas as gerações dos sinais de cavitação, tanto com receptores de banda-estreita quanto de banda-larga, inclusive com níveis configuráveis de ruído. O sinal coerente resultante de cada configuração foi analisado em cada banda espectral de interesse, visando a caracterização de cada evento para a fase de deteção. Propusemos critérios para a deteção das cavitações baseados na relação sinal/ruído para cada banda, descontando-se os efeitos de *crosstalk* entre eventos. Esse procedimento foi aprimorado e avaliado por meio da curva ROC e sua área. Os resultados são animadores, ressaltando-se que a avaliação foi baseada em simulações numéricas com bom nível de realismo.

A partir dos experimentos simulados, concluiu-se que a deteção da cavitação estável é viável, mesmo utilizando receptores de banda estreita. A área sobre a curva ROC obtida foi de 0.9416, com sensibilidade e especificidade da ordem de 0.88 e 0.88, respectivamente. Para a deteção da cavitação inercial com receptores de banda estreita, a AUC cai para 0.9080, com sensibilidade e especificidade de 0.77 e 0.84.

Ressalte-se também que no caso de receptores de banda larga, a faixa (f_{i3}) entre a segunda harmônica e a segunda ultra-harmônica é uma opção para a deteção de cavitação inercial. Nesse caso, a AUC obtida foi de 0.9740, na qual a sensibilidade e especificidade do detector de cavitação inercial foram de 0.92 e 0.91. Isso sugere uma alternativa usando sensores de banda larga ou mesmo sensores de banda estreita, porém com frequência central em torno de f_{i3} .

1. Introdução

Para contextualizar este relatório, mencionaremos resumidamente a relação deste projeto com a sonotrombólise, e a seguir retomaremos a sequência em relação ao relatório anterior, começando com a geração de sinais de cavitação estável e inercial. O relatório completo e detalhado está no repositório institucional do projeto.

Visão geral do projeto e sua relação com a sonotrombólise

A detecção da cavitação aqui proposta envolve a aquisição de sinais ultrassônicos provenientes de múltiplos transdutores (piezoelétricos) dentro de um protocolo para sonotrombólise. Os sinais recebidos contêm primordialmente ecos do meio heterogêneo, e podem também conter sinais de cavitação emitidos por algumas regiões do meio. Os sinais são processados visando estimar a emissão oriunda de possível fonte de cavitação explorando o conceito de coerência de origem, e a partir do sinal estimado caracterizar e localizar a fonte no meio acústico.

O protocolo para aplicação de sonotrombólise proposta consiste, essencialmente, em provocar cavitação por ultrassom (“disparo múltiplo”) em uma determinada região do meio (foco), e prosseguir alterando o foco de modo a cobrir toda a região de interesse, no nosso caso, o coração. O foco é obtido eletronicamente por meio da excitação de múltiplos transdutores com atraso relativo entre eles para atingir coerentemente o foco. O equipamento referido é “cego” por decisão de projeto de forma que possa ser operado por não-especialistas e ser portátil.

O sistema para detecção da cavitação deve atuar logo após cada “disparo de múltiplos transdutores”, adquirindo os sinais ultrassônicos retornados e os processando em busca de fontes de cavitação. A Figure 1.1 ilustra os passos para cada região focal: os blocos A, B e C são os usuais para sonotrombólise; os blocos E, G, H e I são necessários tanto para implementação física quanto para a avaliação numérica da detecção da cavitação; os blocos D e F são para testes por meio de simulação. Todo o processo é repetido para as demais regiões visando a cobertura completa do coração. A proposta visa pesquisar e desenvolver os blocos D a I, e avaliar os resultados por simulação numérica. Pretende-se também realizar testes mais simples em cuba acústica, utilizando-se poucos transdutores.

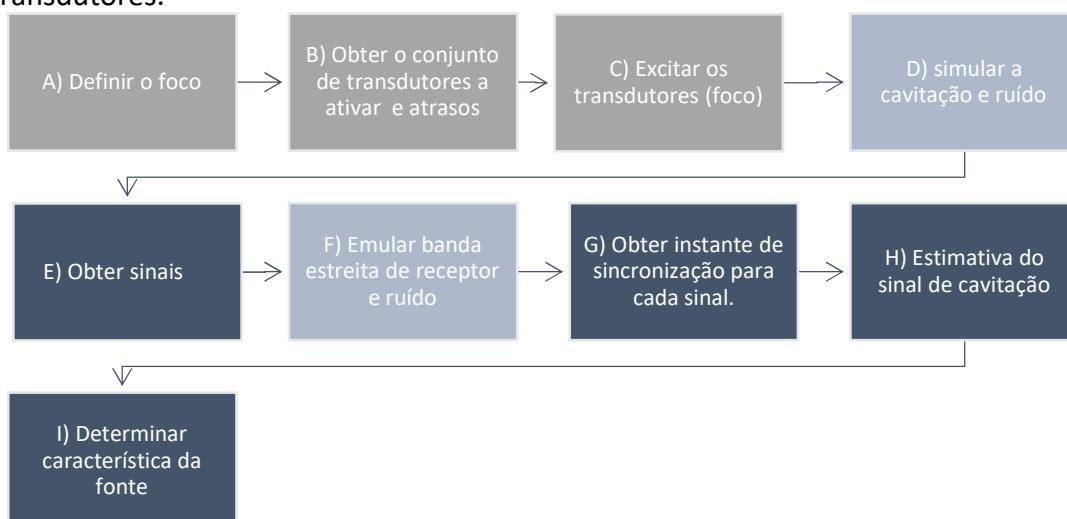


Figure 1.1 Visão global da aplicação da sonotrombólise e da detecção da cavitação. Blocos A,B e C: sonotrombólise; blocos D a I: detecção da cavitação; blocos D e F: simulação numérica.

Para cada foco definido, o sistema para sonotrombólise escolhe um subgrupo de transdutores mais próximos do foco para serem ativados, com devido atraso relativo para atingir o foco em fase.

Para que haja ecos, o meio deve ser heterogêneo e conter objetos contrastantes em termos de impedância acústica, como por exemplo ossos e pulmão. A Figure 1.2c ilustra os cortes ortogonais de um *phantom* simplificado e centrado contendo pedaço de osso e de pulmão, e a Figure 1.2d mostra o sinal temporal recebido em um dos transdutores e o seu espectro (Figure 1.2e). O grande desafio é detectar sinais de cavitação imiscuídos nos sinais recebidos e com sensores de banda estreita. A abordagem pretendida envolve melhorar a relação sinal-ruído por meio da coerência dos sinais recebidos em múltiplos receptores.

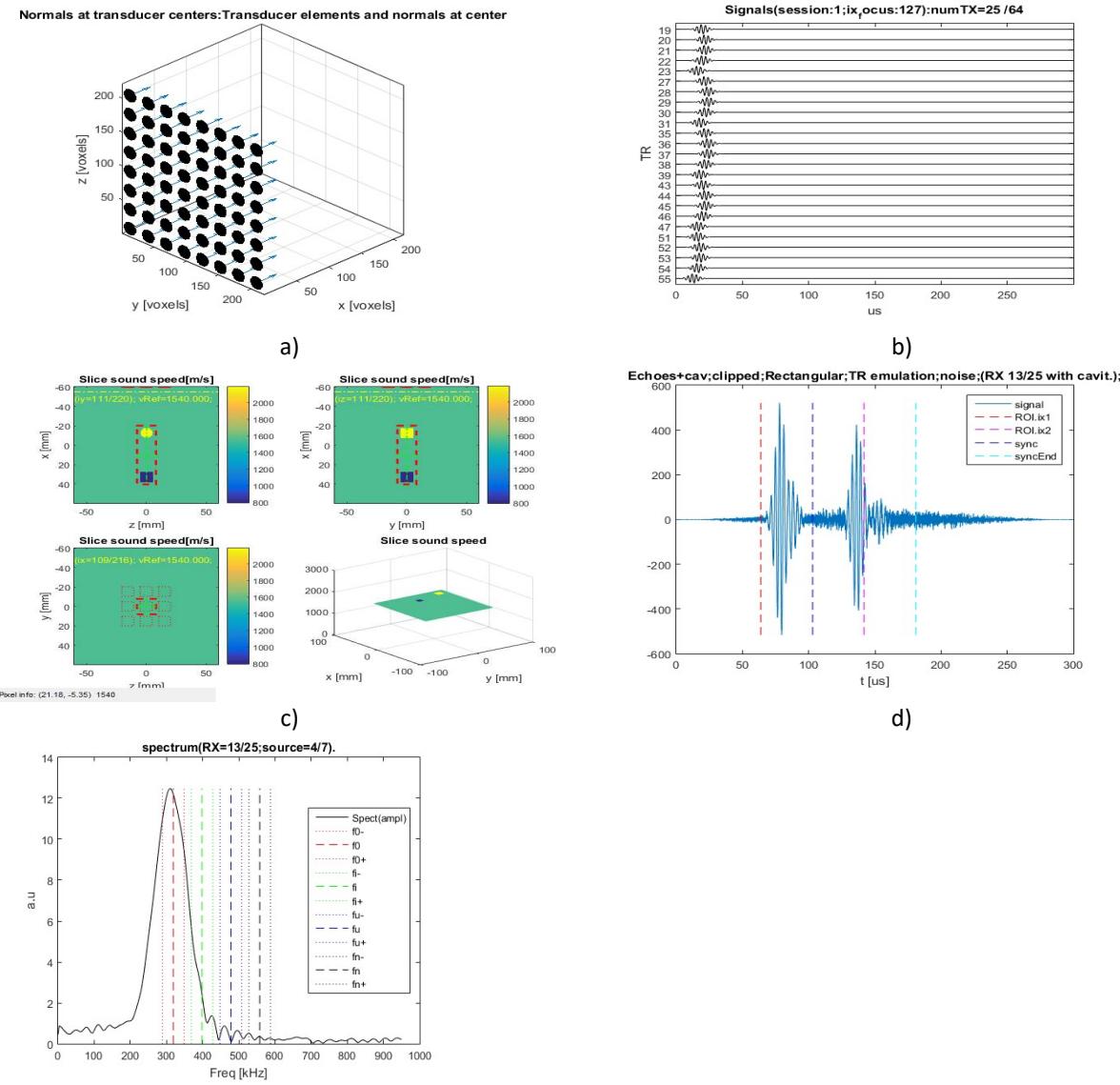


Figure 1.2 Configuração utilizada no sistema para sonotrombólise. a) matriz de transdutores piezo-elétricos (ressonância a 318kHz); b) exemplo de 25 sinais de um subgrupo de 5x5 com os respectivos atrasos; c) cortes ortogonais de um phantom simplificado e centrado contendo pedaço de osso (amarelo) e de pulmão (azul escuro); d) sinal recebido no transdutor número 13 de 25 contendo essencialmente os ecos e ruído; e) espectro (amplitude) do sinal em d).

2. Metodologia (continuação do relatório I)

Formulação do problema

Podemos enunciar o problema a ser resolvido por: “Dado um subconjunto de N_{TR} transdutores de ultrassom (TR), estimar a atividade ultrassônica de uma região em resposta a um estímulo de sonotrombólise.”

A solução do problema para um foco em r_F e o sinal-resposta em um ponto genérico r_q (fonte do meio) pode ser aplicado a todos os demais focos do processo de sonotrombólise. Portanto, vamos detalhar este modelo para um estímulo focado em r_F .

Geometria e sistema de coordenadas para a sonotrombólise

Os subconjuntos de transmissores e receptores são de um conjunto de N_{TR} transdutores conforme mostrados na Figure 1.2a, na qual o centro (0;0;0) do sistema de coordenadas (x,y,z) está no centro do volume. As faces dos transdutores estão localizados no plano (y,z), distribuídos uniformemente, e este plano está em $x=-60$ mm. A distância entre os centros dos TRs é de 15.3 mm e o diâmetro de cada TR é de 10.15mm. O volume é de 120x120x120 mm³. A propagação longitudinal das ondas ocorre no eixo x.

Espectro do sinal

Designaremos por espectro de um sinal, o módulo do espectro de amplitude no domínio da frequência unilateral em contraposição ao espectro em potência bilateral. A justificativa é manter o significado físico da amplitude das componentes em frequência. Especificamente, seja $s[n]; n = 0: N - 1$ um sinal temporal discreto com N amostras, e $F[k]; k = 0: N - 1$ o resultado da aplicação do FFT em $s[n]$. O espectro $S[k]$ utilizado neste projeto é:

$$S[k] \equiv \begin{cases} |F[0]|/N; & k = 0 \\ 2|F[k]|/N; & k = 1: N/2 \end{cases}$$

Ou seja, $S[k]$ é a amplitude da decomposição do sinal $s[n]$ em cossenos até a frequência de Nyquist do sistema de aquisição, e somente para as frequências não-negativas (unilateral).

Manifestação das cavitações no espectro dos sinais recebidos

Neste projeto iremos explorar a manifestação das cavitações nos espectros dos sinais recebidos. Conforme a literatura (Chen, 2016), a cavitação estável se manifesta com oscilações nas frequências chamadas de ultra-harmônicas, que são frequências entre as harmônicas da frequência central (f_0). Desse modo, a ultra-harmônica n seria na frequência:

$$f_{u_n} = \frac{2n+1}{2} \cdot f_0; \quad n = 1, 2, \dots$$

Como utilizaremos receptores de banda estreita, vamos nos concentrar nas primeiras 2 ultra-harmônicas:

$$f_{u_1} = \frac{3}{4} \cdot f_0 \quad \text{e} \quad f_{u_2} = \frac{5}{4} f_0$$

Por outro lado, a cavitação inercial se manifesta como impulso no tempo devido ao colapso das microbolhas. Portanto, o espectro tem componente em todas as faixas de frequência, e se confunde com o espectro do ruído. A intenção para a sua detecção é analisar a relação sinal-ruído (SNR) do sinal recebido. Caso o SNR seja bem superior ao ruído, então há indício de cavitação inercial. Conforme veremos nas próximas seções, a dificuldade é estimar adequadamente o SNR em

face do receptor de banda estreita e da proximidade de eventos de alta intensidade como o eco e a cavitação estável.

Para a detecção da cavidade inercial iremos investigar em bandas distintas das harmônicas e ultra-harmônicas, ou seja,

$$f_{i0} = \frac{3}{4}f_0; \quad f_{i1} = \frac{5}{4}f_0; \quad f_{i2} = \frac{7}{4}f_0; \quad f_{i3} = \frac{9}{4}f_0$$

As atividades imediatas previstas para o período em questão são:

- Simular as cavitações estáveis em resposta ao estímulo e recepção com banda estreita
- Simular as cavitações iniciais em resposta ao estímulo e recepção com banda estreita
- Simular combinação de eco, cavitação estável e inercial em resposta ao estímulo e recepção
- Sinal coerente obtida diretamente no domínio da frequência
- Estimativa do SNR para cada banda de interesse
- Detecção de eventos; métricas e critérios para os detectores

Simulando as cavitações estáveis em resposta ao estímulo

As cavitações estáveis se manifestam com sinais contendo frequências chamadas ultra-harmônicas, que são as frequências entre as harmônicas do sinal transmitido f_0 . Desse modo as frequências das ultra-harmônicas podem ser calculadas por:

$$f_u = \frac{2n+1}{2} \cdot f_0; \quad n = 1, 2, \dots \quad (\text{Eq. 2.1})$$

O nosso interesse é detectar as 2 primeiras ultra-harmônicas, ou seja $n=\{1; 2\}$.

A Figure 2.1 mostra a primeira ultra-harmônica ($n=1, f_u = 375$ kHz) no tempo e seu espectro em amplitude com banda (-6dB) aproximada de 100 kHz.

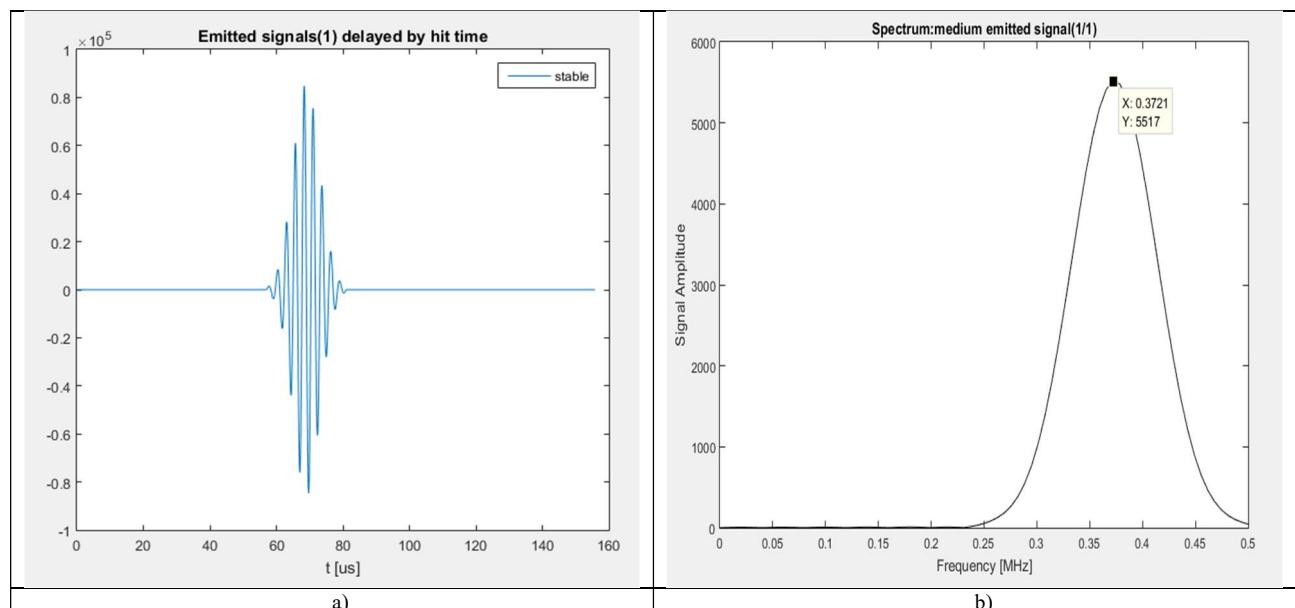


Figure 2.1. a) Sinal emitido por um ponto genérico do meio simulando uma fonte de **cavitação estável** de amplitude 100 kPa, na frequência central de $(250+250/2=375)$ kHz (primeira ultra-harmônica) com duração de 7 ciclos com envelope do tipo gaussiano; b) espectro de amplitude do sinal com aproximadamente banda de 100 kHz a -6 dB. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.08, opção i.0.2)

Recepção de cavitação estável ruidoso com transdutores de banda estreita

O objetivo desta seção é comprovar o efeito da emulação do transdutor no sinal da ultra-harmônica com ruído. Foi adicionado ruído do tipo normal, com média 0 e desvio-padrão igual a 5% da faixa dinâmica do sinal. O sinal ruidoso é filtrado pelas características do receptor (Figure 2.2.b, em cor azul) resultando no sinal mostrado na Figure 2.2a.

Nota-se que o nível do sinal na frequência da primeira harmônica, neste exemplo, é significativamente maior (linha vermelha da Figure 2.2b) do que o nível de ruído de banda larga, tornando possível detectar a presença da primeira ultra-harmônica. Nota-se também o decréscimo em amplitude do sinal quando comparado ao sem filtro.

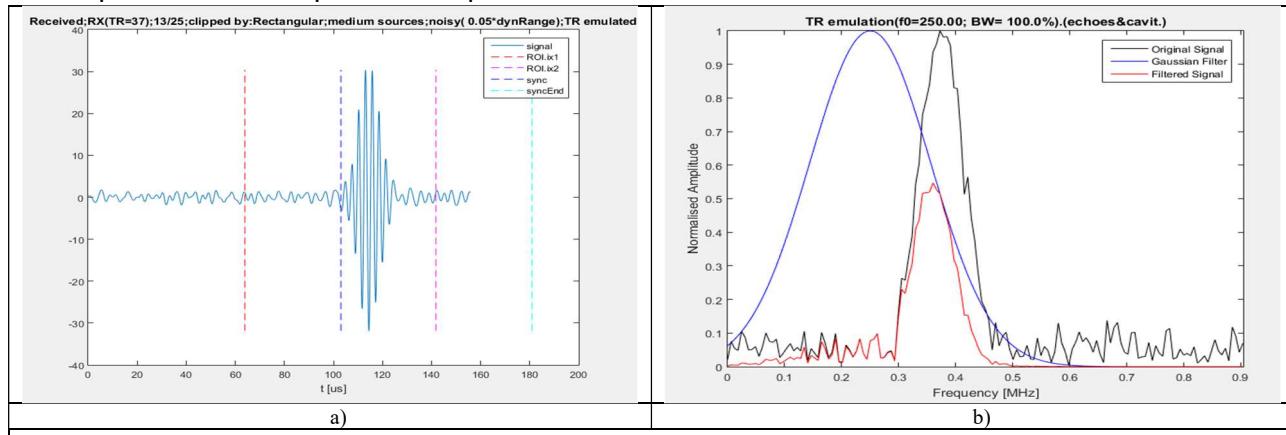


Figure 2.2. a) sinal da primeira ultra-harmônica com ruído filtrado pelo receptor; b) em azul, características do filtro; em preto, espectro do sinal ruidoso; em vermelho, espectro do sinal ruidoso filtrado. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.08, opção i.2)

Simulando as cavitações iniciais em resposta ao estímulo

As cavitações iniciais originam-se com a explosão (colapso) de microbolhas que do ponto de vista físico atuam como impulsos de pressão. Estes impulsos de pressão são caracterizados por um espectro amplo no sinal (Figure 2.3). A figura mostra o espectro em amplitude em uma escala maior de frequência, e percebe-se o efeito do filtro passa-baixas de frequências imposto pelas características da discretização do meio (grade computacional) em pixels. Como a onda se propaga no meio físico, existe a restrição (critério de Nyquist) do pixel ser menor do que a metade do menor comprimento de onda do sinal. Desse modo, no filtro passa-baixas foi utilizada uma frequência de corte da ordem de 924 kHz. Nota-se o efeito da filtragem de grade também no sinal temporal.

A amplitude do impulso devido ao filtro foi reduzida em torno de 2 ordens de grandeza devido ao filtro, pois removeu as altas frequências do impulso (a frequência de amostragem foi de 14.48 MHz), ou seja, atenuou fortemente a banda de 924 kHz a 14.48/2 MHz).

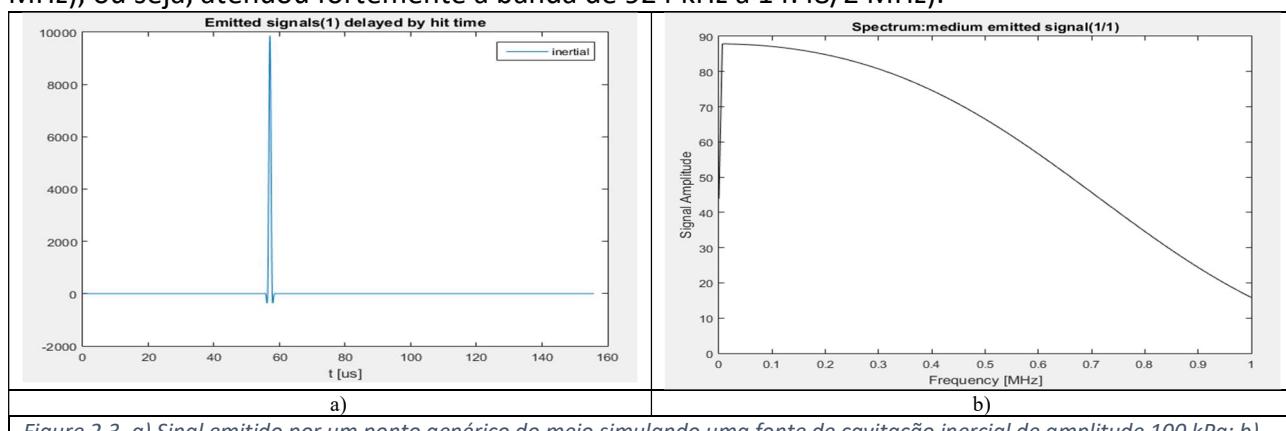


Figure 2.3. a) Sinal emitido por um ponto genérico do meio simulando uma fonte de cavitação inercial de amplitude 100 kPa; b) espectro de amplitude do sinal com banda aproximada de 700 kHz a -6 dB. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.08, i.0.3)

Recepção da cavitação inercial com transdutores de banda larga

O sinal recebido é de baixa amplitude e potência devido ao filtro da grade e à divergência dos raios (Figure 2.4) e ocorre uma distorção (sinal bipolar) no impulso recebido. A figura mostra também o espectro e nota-se que o espectro sofreu um efeito derivativo (rampa nas frequências abaixo de 423 kHz). Este efeito pode ser justificado pelo tamanho do transdutor receptor (TR_{37}) que é de 10.15 mm de diâmetro, enquanto o meio comprimento de onda é de 3.08 mm na frequência central.

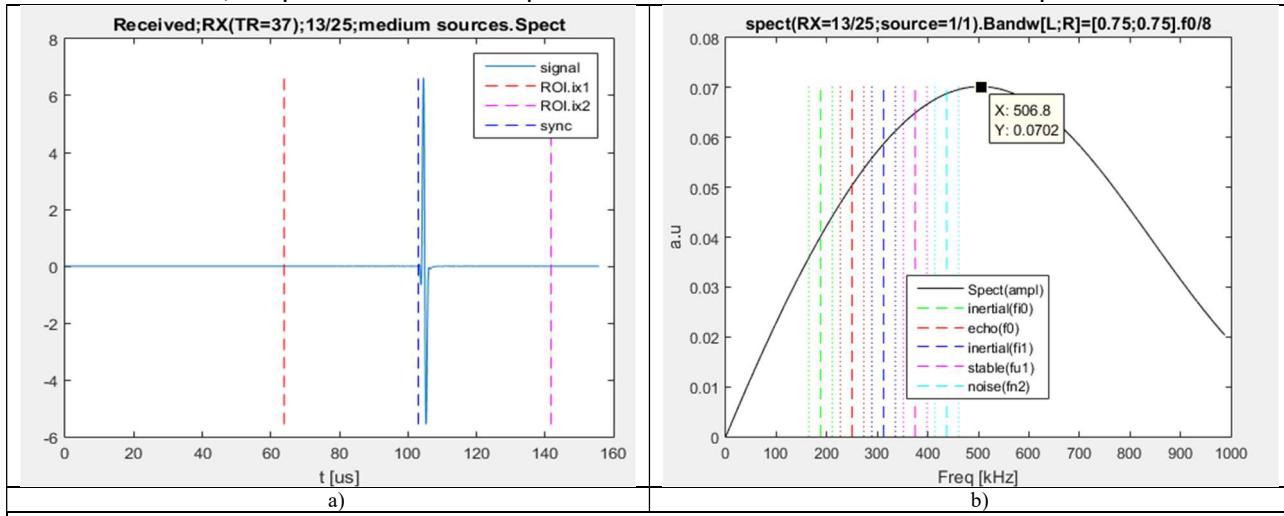


Figure 2.4. a) Sinal recebido pelo receptor ($TR=37$) originado pelo impulso descrito na seção anterior (Figure 2.3); a linha vertical tracejada azul é o instante do sincronismo (t_{sync}) e as linhas verticais vermelhas indicam o início e o fim esperado da ROI; b) espectro de amplitude do sinal com aproximadamente banda de 750 kHz a -6 dB. Percebe-se o efeito da atenuação principalmente causada pela divergência dos raios, bem como o efeito passa-banda pelo tamanho do receptor. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.10, opção i.1)

Recepção da cavitação inercial ruidosa com transdutores de banda estreita

A principal questão é se é possível detectar o impulso na presença de ruído. Assim, o objetivo desta seção é comprovar o efeito da emulação do transdutor no sinal da cavitação inercial com ruído.

Foi adicionado ruído do tipo normal, com média 0 e desvio-padrão igual a 5% da faixa dinâmica do sinal. O sinal ruidoso é filtrado pelas características do resultado no sinal mostrado na Figure 2.5a. Iremos analisar o nível do sinal na banda entre as ultra-harmônicas e harmônicas, em relação ao nível de ruído do sinal após a região de interesse (ROI). A hipótese é que nestas janelas haja menor influência do eco e cavitação estável (ver próximas seções)

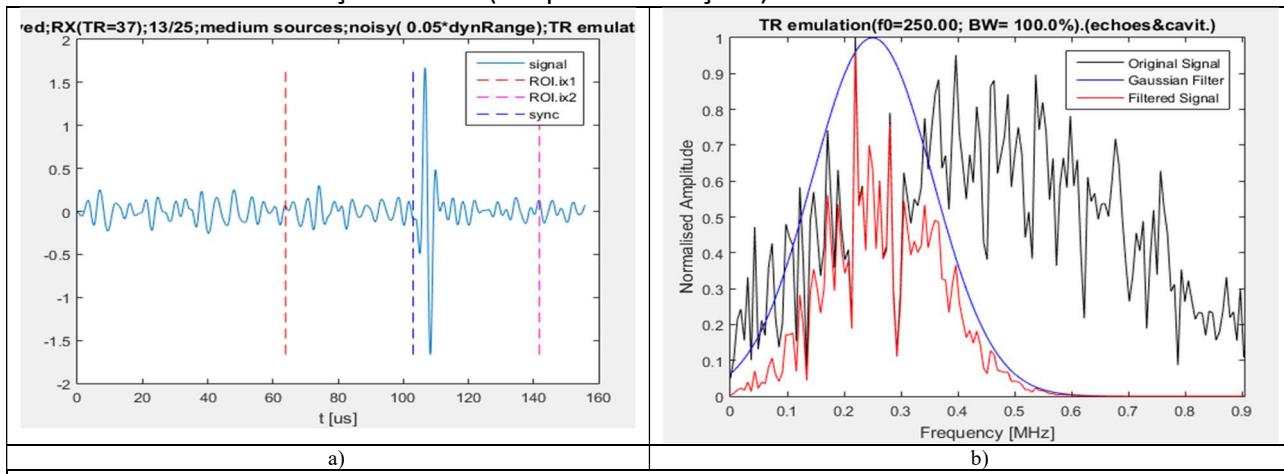


Figure 2.5. a) sinal recebido de cavitação inercial, com ruído, filtrado pelo receptor; b) em azul, características do filtro; em preto, espectro do sinal ruidoso; em vermelho, espectro do sinal ruidoso filtrado. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.10, opção i.2)

Simulando combinação de eco, cavitação estável e inercial em resposta ao estímulo

A detecção do eco, cavitação estável e cavitação inercial dependerão da amplitude do sinal recebido, em relação ao ruído, na banda de frequência de cada tipo de fonte. Vamos simular uma região que emita todos estes sinais e avaliar a possibilidade de distinguir cada tipo.

Seja, portanto, um ponto q no meio que atue como fonte de sinais na posição r_q , com sinal temporal emitido dado por:

$$p_q(t) = E_0 \cdot \text{eco}(t) + S_0 \cdot \text{cavEst}(t) + I_0 \cdot \text{cavInert}(t) + \text{perc}_n \cdot \text{ruido}(t); q \text{ em } r_q \quad (\text{Eq. 2.2})$$

O ponto q está coincidindo com o ponto focal F para facilitar os cálculos, mas não necessariamente deve ser um ponto focal.

As amplitudes de $\text{eco}(t)$, $\text{cavEst}(t)$ e $\text{cavInert}(t)$ são de fonte pontual a 100 kPa, conforme os casos anteriores, i.e., eco com frequência central em $= 250 \text{ kHz}$ e $\text{cavEst}(t)$ em 375 kHz . A cavitação inercial é impulso no tempo e banda larga na frequência, dificultando a detecção pois o ruído é também banda larga. Os valores de E_0 , S_0 e I_0 serão usados para alterar os valores relativos, ou mesmo inibir algum deles, para verificar a detectabilidade de cada tipo, e serão inicialmente iguais a 1. O nível de ruído é controlado pelo parâmetro perc_n , que é uma fração da faixa dinâmica do sinal, em geral do $E_0 \cdot \text{eco}(t)$. Na ausência do eco, é a faixa dinâmica do sistema de aquisição de sinais. O sinal $\text{ruido}(t)$ tem média 0, desvio-padrão unitário e distribuição normal. Desse modo, o desvio-padrão do sinal $\text{perc}_n \cdot \text{ruido}(t)$ é perc_n multiplicado pela faixa dinâmica do sistema.

Nota-se que o nível do inercial no espectro é da ordem de 1/100 do eco, pois ocorre o espalhamento espectral e uma banda importante foi filtrada.

Sinal emitido de fonte misto equalizado em energia

Chamaremos de sinal misto equalizado o sinal gerado com maior amplitude de cavitação inercial, de modo a equalizar, aproximadamente, as amplitudes recebidas:

$$p_q(t) = E_0 \cdot \text{eco}(t) + S_0 \cdot \text{cavEst}(t) + I_0 \cdot \text{cavInert}(t) + \text{perc}_n \cdot \text{ruido}(t); q \text{ em } r_F$$

Onde, $E_0 = S_0 = 1$; $I_0 = 25$ e $\text{perc}_n = 0$

Recepção de sinal misto equalizado ruidoso: transdutores de banda estreita

Foi adicionado ruído do tipo normal, com média 0 e desvio-padrão igual a 5% da faixa dinâmica do sinal. O sinal ruidoso é filtrado pelas características do receptor resultando no sinal mostrado na Figure 2.6a. Iremos analisar o nível do sinal em várias bandas para a detecção de cada tipo, em relação ao nível de ruído do sinal fora da região de interesse (ROI). A hipótese é que nesta janela temporal (após o ROI) haja essencialmente o ruído.

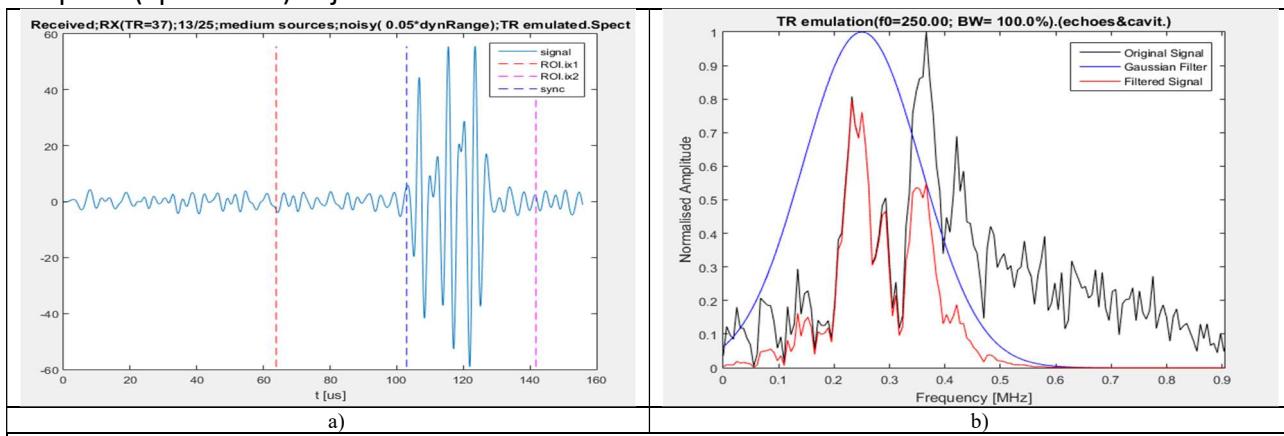


Figure 2.6. Fontes equalizadas ($E_0=S_0=1$; $I_0=25$). a) sinal recebido de sinal misto equalizado, com ruído (5%), filtrado pelo receptor; b) em azul, características do filtro; em preto, espectro do sinal ruidoso; em vermelho, espectro do sinal ruidoso filtrado; c)espectro do sinal sem normalização. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.10, opção i.2)

Sinal coerente obtido diretamente no domínio da frequência

Os sinais recebidos são sincronizados no domínio da frequência por meio de deslocamento de fases.

O sinal misto equalizado foi gerado com os parâmetros $[E_0 \ K_0 \ I_0 \ per_{noise}] = [1; 1; 25; 0.05]$; 7 ciclos do eco; a banda utilizada para cada evento foi com faixa à esquerda e direita definidos por $[F_L \ F_R] = [1.00; 0.50]$. O receptor é tipo passa-banda com frequência central em 250 kHz e banda de 100%. Os resultados (SNR) obtidos pela média de cada banda em relação ao ruído estimado são anotados em $[S_{i0} \ S_0 \ S_i \ S_u \ S_{i2}]$ (dB). As frequências referências são: $[f_{i0} \ f_0 \ f_{i1} \ f_u \ f_{i2}] = [187.50 \ 250.00 \ 312.50 \ 375.00 \ 437.50]$ kHz.

Para esta configuração, os espectros obtidos são mostrados na Figure 2.7, do espectro em amplitude de um dos sinais recebidos dentre 25 receptores, e após a realização do D&S no **domínio da frequência**, bem como os sinais temporais correspondentes.

Os resultados obtidos diretamente no domínio da frequência e aqueles no domínio do tempo são similares, o que justifica usar a presente abordagem.

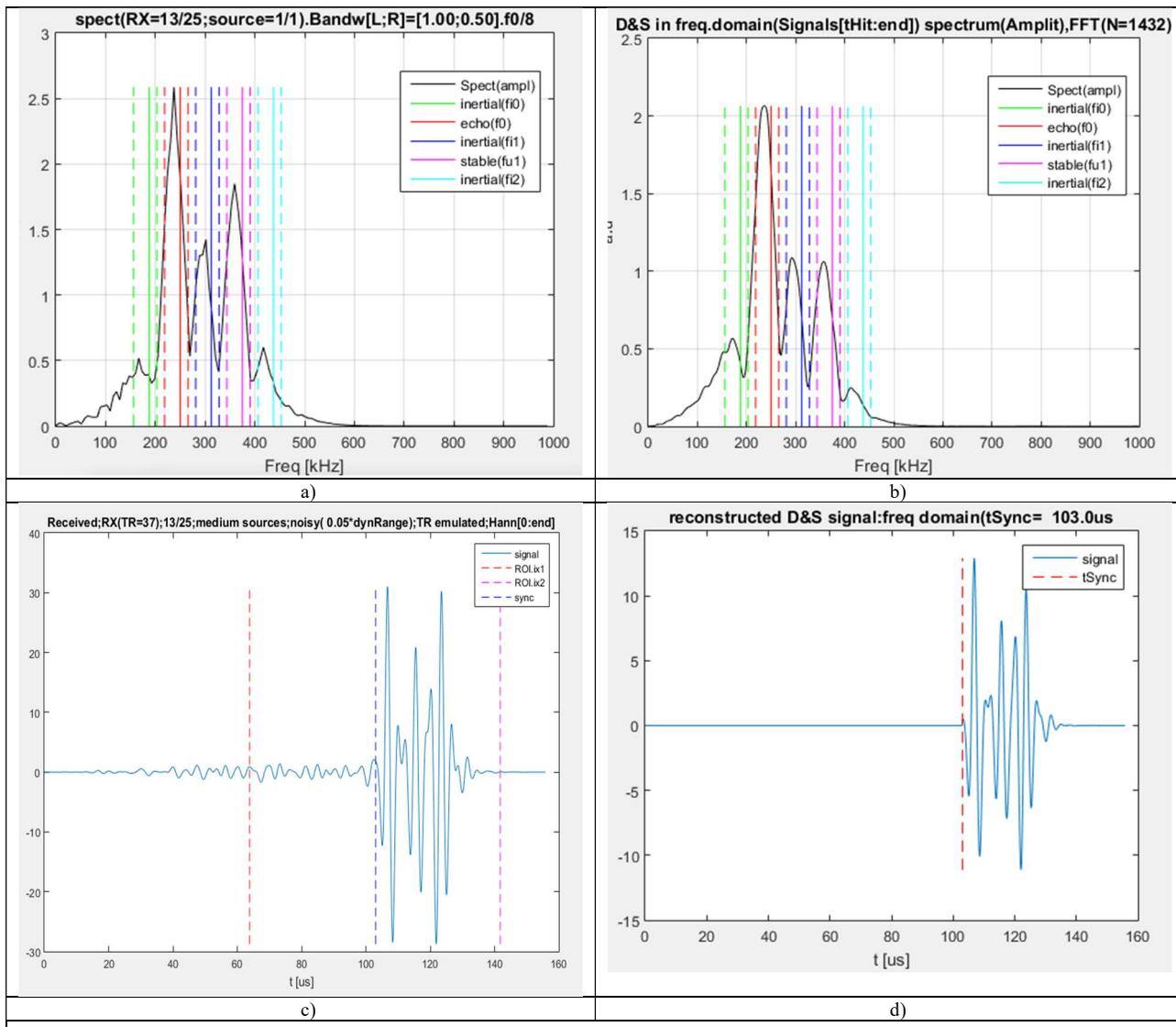


Figure 2.7. Sinais recebidos de fonte mista equalizada, banda estreita com ruído(5%), $F_L=1.0$; $F_R=0.50$; janela de Hann. D&S no domínio da frequência. a) Espectro de sinal **recebido** por um receptor ($TR=37$); b) espectro do sinal resultante da sincronização (D&S); c) e d): sinais temporais correspondentes . Legendas:{ $f_{i0}=187.5\text{kHz}$; $f_0=250.0\text{kHz}$; $f_u=375.0\text{kHz}$; $f_{i1}=312.5\text{kHz}$; $f_{i2}=437.5\text{kHz}$; (obtido via mainSonoTrombolise.m, v3.14, opção i.2.0)

3. Detecção de eventos: aspectos gerais

Iremos considerar o sinal misto com ruído e comparar a razão do valor médio do espectro em cada faixa em relação ao nível do ruído estimado (SNR). O valor da amplitude da cavitação estável, inercial e do ruído serão variados visando criar um grande conjunto de sinais para testar a detecção das cavitações e estabelecer os limites da sensibilidade.

O sinal gerado no ponto q do meio (fonte) é:

$$p_q(t) = E_0 \cdot eco(t) + K_0 \cdot cavEst(t) + I_0 \cdot cavInert(t) + ruido(t); q \text{ em } r_F \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde os sinais { $eco(t)$; $cavEst(t)$; $cavInert(t)$ } são gerados com fonte de 100 kPa cada e multiplicados pelos respectivos coeficientes $\{E_0, K_0, I_0\}$ de modo a variar as amplitudes relativas de cada evento.

O ruído é do tipo normal com média 0 e desvio-padrão igual a um fator (per_{noise}) da faixa dinâmica dos sinais recebidos de eco, $s_{eco}(t)$, que considera todos os sinais recebidos pelos transdutores para $eco(t)$ com fonte de 100 kPa. A amplitude dos sinais em $s_{eco}(t)$, depende de E_0 e do meio percorrido do ponto q até os receptores. Na prática, usa-se a faixa dinâmica do sistema de captação de modo a evitar a saturação dos sinais de entrada, ou então, determinam-se os extremos dos sinais recebidos (Eq. 3.2).

$$ruido(t) = N(0, std); \quad (\text{Eq. 3.2})$$

$$std = per_{noise} * (\max(s_{eco}(t)) - \min(s_{eco}(t)))$$

Na ausência do eco, ou seja, se $E_0 = 0$, usa-se a faixa dinâmica do sistema.

Portanto, pode-se definir genericamente *faixaDinSinalEco* pela diferença dos extremos ou configurado pelo sistema:

$$std_{ruido} = per_{noise} * faixaDinSinalEco$$

A justificativa para se usar a faixa dinâmica do eco, e não a do eco somado com as cavitações, é assegurar que o nível de ruído seja o mesmo independentemente se houver ou não cavitação.

Devido à linearidade, podemos alterar as amplitudes relativas da cavitação estável e inercial em relação ao eco por meio dos parâmetros K_0 e I_0 . Uma vez fixado o eco, por exemplo com fator $E_0 = 1$, e o ponto q , obtém-se os sinais nos receptores, $s_{eco}(t)$. O nível de ruído adicionado será função da faixa dinâmica destes sinais. O desvio-padrão do ruído será dado por (Eq. 3.2).

A amplitude temporal do evento deve sobressair-se ao ruído para que seja detectado, portanto as amplitudes devem ser pelo menos comparável ao std_{ruido} .

Outro aspecto importante é definir o critério (limiar) para classificar cada um dos eventos, por exemplo em cavitação inercial. Claramente, o limiar será função do nível de ruído, e espera-se que se o nível na banda do evento for superior ao dobro da potência do ruído (6dB), pode-se classificar como evento ocorrido.

Como temos interesse na região do eco (f_0), do impulso $\{f_{i0}, f_{i1}, f_{i2}, f_{i3}\}$ e da ultra-harmônica (f_{u1}) nota-se que a máxima banda deve ser de $f_0/4$, que é a distância entre os centros das bandas de interesse. Portanto, para evitar sobreposição e influência de outros eventos, a metade da banda de frequência de cada evento deve ser menor do que $f_0/8$.

A banda considerada para cada evento se inicia à esquerda com deslocamento $F_L * \frac{f_0}{8}$ e à direita por $F_R * \frac{f_0}{8}$, ou seja, no intervalo $[f_c - F_L * \frac{f_0}{8}; f_c + F_R * \frac{f_0}{8}]$; f_c : frequência central da banda, e, portanto, a banda resultante será $B \equiv (F_L + F_R) * \frac{f_0}{8}$.

Em termos de ruído, espera-se que os resultados sejam pouco sensíveis a diferentes níveis de ruído, pois iremos utilizar a relação sinal/ruído como medida básica.

Conforme mencionado, o espectro do sinal coerente pode ser obtido por via D&S no tempo ou no domínio da frequência.

Medidas para as deteções: SNR

As seções anteriores mostraram a ocorrência de eventos tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo para uma situação específica: fatores de amplitude iguais a [EO; SO; IO]=[1 ; 1 ; 25]; nível de ruído a 5%; banda de [FL,FR]; e uso do zero-padding para interpolação na frequência.

Nota-se que em ambos os métodos, aparentemente, é possível detectar corretamente todos os 3 eventos (eco, cavitação estável e cavitação inercial) usando o espectro e quantificando as respectivas bandas. Contudo, ainda não foi avaliada a capacidade de detectar com acurácia a presença ou não da cavitação, pois pode haver falsos positivos, ou seja, o algoritmo concluir erroneamente a presença da cavitação. Portanto, torna-se fundamental realizar medidas que permitam detectar eventos, mesmo na presença de outros eventos além do ruído.

Relembrando as frequências centrais em ordem crescente (passos de $\frac{f_0}{4}$) são:

$f_{i0} = 3/4f_0$; freq. central da inercial i0	(Eq. 3.3)
f_0 ; freq. central do eco	
$f_{i1} = 5/4f_0$; freq. central da inercial i1	
$f_{u1} = 3/2f_0$; freq. central da primeira ultra-harmônica	
$f_{i2} = 7/4f_0$; freq. central da inercial i2	
$f_{i3} = 9/4f_0$; freq. central da inercial i3	
$f_{u2} = 10/4f_0$; freq. central da segunda ultra-harmônica	

Sejam: R o valor médio da amplitude espectral do ruído obtido conforme a seção “Recepção de sinal misto equalizado ruidoso: transdutores de banda estreita”, usando o sinal temporal após o ROI;

$A(f)$ a amplitude espectral em função da frequência e $S(f)$ a amplitude espectral em dB em relação ao ruído (SNR), definido por:

$$S(f) = 20 \log_{10} \left(\frac{A(f)}{R} \right); \quad A(f): \text{amplitude espectral em } f; \\ R: \text{nível espectral estimado do ruído.}$$
(Eq. 3.4)

A Figure 4.1a mostra um exemplo de $A(f)$, e Figure 4.1b mostra em dB, $S(f)$, para um caso em que ocorre apenas o eco.

Definindo-se a função sinal/ruído médio (SNR) na banda de f por

$$SNR(f; B_W) = 20 \log_{10} \left(\frac{\bar{A}(f; B_W)}{R} \right); \\ \bar{A}(f; B_W): \text{amplitude espectral média na banda } B_W$$
(Eq. 3.5)

Observação: a justificativa para se usar o ruído como referência é uma decisão de projeto, pois há poucas opções. A princípio, não se deve utilizar o espectro em valor absoluto uma vez que o sinal pode conter apenas eco ou cavitação estável ou cavitação inercial ou nenhum deles. Portanto, não se pode presumir que sempre existirá eco ou outro evento como referência. Contudo, deve-se estar ciente de algumas consequências:

- À medida que o ruído aumenta, para a mesma potência de qualquer evento, a relação SNR decresce, mas a diferença permanece a mesma entre 2 eventos, a menos da aleatoriedade do ruído;
- A SNR é afetada pela resposta em frequência do transdutor, pois a ultra-harmônica e o impulso serão atenuados;

- O espectro de um evento interfere no do outro evento, porque as bandas estão próximas.

Conforme se percebe na Figure 4.1, mesmo sem a ocorrência da ultra-harmônica e na presença do receptor, há energia na banda de f_u em consequência da banda do eco. Portanto, torna-se necessário levar em conta essa energia para aplicar os critérios de detecção.

De uma forma mais geral, seja um receptor RX e considere um evento X, por exemplo o eco, que tem amplitude espectral média $A_X(f_1; B_W)$ na sua banda de f_1 e tem amplitude espectral $A_X(f_2; B_W)$ em outra banda de interesse f_2 , por exemplo da ultra-harmônica. Supondo que queiramos detectar um evento Y na sua banda f_2 , a amplitude espectral do evento Y, $A_Y(f_2; B_W)$, estará superposta ao de X. Portanto, torna-se necessário verificar se a diferença entre o que se mede na banda de f_2 supera a SNR de $A_X(f_2; B_W)$, ou seja, se a diferença $\Delta S(f_2)$ é maior do que 0 dB (critério 1):

$$\Delta S(f_2) \equiv S(f_2) - 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{R} \right) > 0 \text{ dB}; \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$S(f)$: SNR medido na banda de f

O termo $\left(\frac{A_X(f_2)}{R} \right)$ depende do ruído e na prática se desconhece o valor de $A_X(f_2)$ para um evento X com intensidade genérica. No entanto,

$$20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{R} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_1) \cdot A_X(f_2)}{R \cdot A_X(f_1)} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_1)}{R} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{A_X(f_1)} \right),$$

Definindo atenuação de X em f_2 , $att_X(f_2) \equiv 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{A_X(f_1)} \right)$, e assumindo que em f_1 a amplitude se deve apenas ao evento X, segue

$$20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_1)}{R} \right) \cong S(f_1), \text{ e}$$

$$20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{R} \right) = S(f_1) + att_X(f_2), \text{ substituindo na (Eq. 3.6),}$$

$\Delta S(f_2) = S(f_2) - [S(f_1) + att_X(f_2)] > 0 \text{ dB}$, como o termo em colchetes é uma estimativa do SNR do evento X na banda de f_2 , limita-se em 0, pois o evento X pode não estar presente e $att_X(f_2)$ é, em geral, negativa:

$$\Delta S(f_2) = S(f_2) - \max \{S(f_1) + att_X(f_2); 0\} > 0 \text{ dB}$$

Onde o operador $\max\{\text{arg1}; \text{arg2}\}$ retorna o maior entre $\{\text{arg1}; \text{arg2}\}$.

Contudo, conforme mencionado, há subestimação do ruído e devemos considerar um limiar de decisão, SNR_thresh :

$$S(f_2) - \max \{S(f_1) + att_X(f_2); 0\} > SNR_thresh(f_2) \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Portanto, os critérios para a ocorrência do evento Y são:

$$S(f_2) - \max \{S(f_1) + att_X(f_2); 0\} > SNR_thresh(f_2) \quad (\text{Eq. 3.8})$$

$S(f)$: SNR do espectro do sinal recebido pelo RX na faixa de f

$att_X(f_2)$: atenuação (dB) do evento X na frequência f_2 em relação à central

Note-se que o termo $att_X(f_2)$ é em geral negativo e pode ser obtido considerando as medidas de S(f) em que ocorrem apenas evento X e ruído, e é independente do ruído:

$$att_X(f_2) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{A_X(f_1)} \cdot \frac{R}{R} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_2)}{R} \right) - 20 \log_{10} \left(\frac{A_X(f_1)}{R} \right) = S_X(f_2) - S_X(f_1)$$

Ressalte-se que foi negligenciado o efeito do evento Y na amplitude do evento X na frequência central f_1 , i.e., em $A_X(f_1)$.

Os resultados obtidos para o SNR para frequências específicas também valem para os SNR de médias de amplitudes espetrais. Desse modo, usaremos indistintamente os símbolos $S(f)$ ou $SNR(f; B_W)$.

Para simplificar a notação, o SNR das amplitudes espetrais médias medidas serão designadas por: $S_{i0} \equiv SNR(f_{i0}; B_W)$; $S_0 \equiv SNR(f_0; B_W)$; $S_{i1} \equiv SNR(f_{i1}; B_W)$; $S_u \equiv SNR(f_u; B_W)$; $S_{i2} \equiv SNR(f_{i2}, B_W)$; e $S_{i3} \equiv SNR(f_{i3}, B_W)$;

Nas próximas seções, serão abordados os critérios para se estabelecer o “ground truth” de cada sinal, bem como as avaliações dos detectores.

Amplitude mínima detectável da cavitação para um nível de ruído

Conforme mencionado anteriormente, a deteção de um evento depende da relação sinal/ruído (SNR), ou seja, à medida que a amplitude do evento diminui em relação ao ruído, torna-se mais difícil a sua deteção. No limite, haverá várias situações nas quais os detectores irão inevitavelmente falhar, afetando a avaliação de desempenho dos detectores. Portanto, no caso das simulações das cavitações, é importante estimar quais são as amplitudes mínimas detectáveis perante um dado nível de ruído.

As amplitudes das cavitações geradas são amplificadas pelos parâmetros K_0 e I_0 , e a do eco por E_0 . As amplitudes recebidas de cada evento não são necessariamente proporcionais ao do eco, pois dependerão de:

- Resposta em frequência do receptor, que pode atenuar mais severamente as frequências mais elevadas em relação a f_0 (eco);
- Distribuição espectral de energia do sinal emitido: como o sinal de cavitação é um pulso com duração curta, o seu espectro se distribui em torno da frequência principal, ou seja, não se concentra por exemplo na frequência f_{u1} , no caso da primeira ultra-harmônica (Figure 2.1), reduzindo a amplitude na frequência f_{u1} . A banda do espalhamento em frequência do pulso é proporcional à frequência central e inversamente proporcional à duração do pulso;
- Meio de propagação, i.e., os meios podem atenuar diferentemente as ondas de frequências distintas;
- Divergência da propagação das ondas.
- Quantidade de fontes emissoras, no caso estamos usando apenas um voxel emitindo em q.

Mesmo supondo meio homogêneo sem atenuação e usando um receptor de banda larga, ou seja, removendo as dependências a) e c), as amplitudes das cavitações irão depender da distribuição espectral dos sinais emitidos. Este fato colabora na redução causada por (d) das amplitudes dos sinais recebidos. A redução de amplitude recebida dos eventos pode ser verificada por meio dos resultados anteriores, nos quais usamos fonte de 100 kPa, 7 ciclos, e $E_0 = 1$ (sinal de pico emitido, $V_p = 90 \text{ kPa}$, e valor espectral em $f_0, S_p = 6000$:

- Para o caso do eco recebido com banda larga, nota-se que a amplitude máxima do sinal é da ordem de $V_p(\text{eco}) = 55$ com valor espectral centrado em f_0 igual a $S_p(\text{eco}) = 3.47$, implicando em fator de redução de 6.1×10^{-4} (-64 dB). A banda do eco é da ordem de 100 kHz.
- Para cavitação estável, receptor com banda larga, nota-se que as amplitudes são similares ao do eco, pois as bandas dos sinais são similares. Conclui-se que com receptores de banda larga, a amplitude do sinal de cavitação estável recebido será determinada por K_0 em relação ao E_0 , ou seja, $\left(\frac{K_0}{E_0}\right)$;
- Para cavitação inercial, receptor com banda larga, ocorre redução drástica da amplitude, devido adicionalmente ao espalhamento espectral extremo (sinal de banda larga). Nota-se (Figure 2.4) a energia do impulso se distribui por uma banda bem maior, da ordem de 800 kHz, resultando em amplitude do sinal temporal em $V_p(\text{inercial}) = 6$; $S_p(\text{inercial}) = 0.07$, ou seja, uma redução em relação ao eco recebido da ordem de 6/55. Portanto, para que a amplitude do sinal temporal da cavitação inercial seja comparável ao do eco, o valor de I_0 deve ser maior do que 55/6. Uma possível explicação para esta redução:
 - No caso contínuo, um impulso com área I_0 teria espetro contínuo infinito com amplitude I_0 ;

- b) No caso discreto e realístico, há limitação de banda do sistema e da frequência do sistema. Estamos utilizando frequência de amostragem $f_a = \frac{1}{dt} = 14.5 \text{ MHz}$. Portanto, em teoria a energia seria distribuída em toda a banda desde 0 até $f_a/2$. Contudo, devido à banda limitada, o sinal sofre deformação e redução de amplitude de acordo com a banda $Bw = 800 \text{ kHz}$. Simplificando para simples proporcionalidade, temos:

$$V = \frac{Bw}{(\frac{f_a}{2})} \cdot I_0 , \text{ resultando em } V \approx 2 \frac{0.800}{14.5} \cdot I_0 = 0.11 I_0 \text{ ou } I_0 \approx 9 V. \text{ Portanto, se desejarmos}$$

que V seja da mesma ordem de E_0 , devemos aplicar $I_0 > 9 E_0$

No caso de receptores de banda estreita, o problema torna-se ainda mais complexo, pois dependerá da banda de frequência do receptor.

Para efeito de análise usaremos $I_0 = 10E_0$ para equiparação com a faixa dinâmica do eco, ou seja, para que a amplitude do sinal recebido de cavitação inercial seja comparável ao do eco recebido gerado por E_0 , a amplitude da geração do impulso deve ser $I_0 = 10E_0$

Uma vez estabelecido o nível de ruído por per_{noise} (Eq. 3.2), o desvio-padrão do ruído será $std_{ruido} = per_{noise} * faixaDinSinalEco$, no qual o valor de $faixaDinSinalEco$ é definido pelo sistema de aquisição (ou faixa dinâmica de recepção) e é proporcional a E_0 . Assim, se por exemplo $per_{noise} = 5\%$, significa que o nível de ruído é da ordem de 5% da faixa dinâmica do sistema.

Portanto, no caso de cavitação estável com receptores de banda larga, se quisermos gerar sinais da mesma ordem do ruído, o valor de K_0 será igual a $per_{noise} \cdot E_0$. Desse modo, no caso do exemplo dado, $per_{noise} = 5\%, E_0 = 1$, podemos gerar sinais de cavitação estável com valores de $K_0 = \{0.05; 0.10; 0.15; \dots 1.0; \dots\}$. Note que o valor inicial de K_0 pode ser menor do que $per_{noise} \cdot E_0$, porém o detetor pode estar no limite da sua capacidade. No caso de receptores de banda estreita, o valor inicial de K_0 deve ser ainda superior a $per_{noise} \cdot E_0$, pois a amplitude do sinal de cavitação recebida terá sido ainda mais atenuada.

No caso de cavitação inercial, a redução de amplitude é mais acentuada, e então devemos utilizar valores maiores de I_0 em relação ao per_{noise} , pelo menos em 10 vezes. Assim, no exemplo com $per_{noise} = 5\%, E_0 = 1$, os valores de I_0 se iniciariam em $\{0.5; 0.6; \dots\}$, de modo a gerar sinais de cavitação que seriam recebidos com amplitude similar ao do ruído. Vale a observação anterior, ou seja, provavelmente este nível inicial de I_0 ainda será pequeno frente ao ruído no caso de receptores de banda estreita.

Em resumo, propomos que os níveis iniciais de deteção de cavitação estável e inercial para um dado nível de ruído sejam próximos a:

$K_{min} = per_{noise} \cdot E_0$	$(Eq. 3.9)$
-----------------------------------	-------------

$I_{min} = 10 per_{noise} \cdot E_0$	
--------------------------------------	--

Valores sugeridos para receptores de banda larga de modo que os sinais recebidos sejam da ordem do nível do ruído.	
---	--

Procedimentos para avaliação da detecção

Nesta seção serão descritos os procedimentos para a avaliação de detecção para um determinado critério, por exemplo o critério 4.03.18, tanto para banda estreita quanto para banda larga.

Geração do conjunto de sinais para análise da detectabilidade

Determinar a capacidade de detecção de uma abordagem envolve um número bastante elevado de experimentos ou simulações, pois é necessário variar os valores de K0 e I0. Para cada par (K0,I0) verificar se as detecções obtidas estão corretas ou não, determinando as taxas de positivos-falsos (FP) e negativos-falsos (FN), a partir da qual pode-se estimar a área (AUC) da ROC (Receiver Operating Characteristic).

Nesta avaliação, usaremos o script “**main_batch_E0_K0_I0_noise.m**” para gerar as simulações. Após definir os parâmetros de interesse como noise (per_noise), E0, K0, I0, este script gera uma tabela .xlsx cujo nome do arquivo tem o sufixo definido em “arq_results_sufixo”.

Usaremos inicialmente passos iguais a Kmin e Imin para verificar se estes valores estão realmente na fronteira da decisão para ruído definido por Per_noise (Per_noise=0.02; Kmin=0.02 e Imin=0.2). Se sim, faremos mais simulações com passos mais refinados no entorno deles, por exemplo Kmin/4 e Imin/4. Caso não estejam na fronteira da decisão, os valores de Kmin e Imin serão reajustados e então refinados. Outros parâmetros importantes para as simulações são: nCycles=7 (duração do pulso); FL=FR=0.50 (largura de banda de cada faixa em função de $f_0/8$); e tipo de receptores (p.ex. banda larga) definido em opt_task='j.2.0' ou 'i.2.0' (banda estreita).

Programas para a avaliação dos detetores

A tabela .xlsx resultante, com 2091 linhas no citado exemplo, contém várias colunas, em especial: amplitudes dos eventos simulados; SNR (Sxx, xx representa a faixa de interesse, por exemplo, Su1) medido em cada faixa e resultados (valores efetivos do SNR) da aplicação dos critérios (“*Critérios para detectar cavitação estável: receptor de banda estreita*”, “*Critérios para detectar cavitação inercial: receptor de banda estreita*”) que foram denominados de eff_xx como na ilustração a seguir:

[E0]	K0	I0	K2]	[Si0]	S0	Si1	Si1	Si2	Si3	Si2]	[eff_i0]	eff_0	eff_i1	eff_u1	eff_i2	eff_i3	eff_u2]
1	0	0	0	28,2	43,1	28,9	-1,6	-10,2	-23,1	-30,2	1,1	43,1	1,4	-1,6	-10,2	-23,1	-30,2
1	0	0,25	0	28,9	44	29,8	-2,1	-6,5	-21,8	-24,1	0,9	44	1,4	-3,3	-6,5	-21,8	-24,1
...

Os resultados das classificações para cada banda também constam da tabela, porém são baseados nos critérios fixados no programa. No entanto, as colunas após “eff_i0”, inclusive, podem ser modificados por comandos do excel de modo a testar novos critérios baseados nos SNRs calculados.

Os valores de [K0,I0] em conjunto com o Kmin e Imin determinam a presença ou não das respectivas cavitações (“ground truth”). Os valores de Kmin e Imin são parâmetros de entrada para a análise de detectabilidade do tipo ROC, e é considerado que a cavitação está presente (“ground truth”) se $K0 \geq Kmin$.

O parâmetro S da curva ROC, baseado no script “**xls_read_and_ROC.m**”, é o SNR efetivo “eff_xx” da tabela. O valor de S que resulta em menor FP e FN (menor distância euclidiana ao $FP=FN=0$) é retornado pelo script na variável “S_min_FP_FN”, que se espera seja próximo do valor correspondente de SNR_thresh da faixa. A análise do tipo ROC pode ser realizada para cada uma das faixas de interesse, em especial, cavitação estável pela faixa f_{u1} ; cavitação inercial pelas faixas f_{i1}, f_{i2} e f_{i3} .

Note que a ROC somente depende do “ground truth” e das medidas, no caso “eff_u1”, ou seja independe do SNR_thresh.

Uma vez definido o limiar do parâmetro S para a classificação, por exemplo definindo SNR_thresh por uma tabela pré-definida ou pelo valor S_min_FP_FN retornado pelo programa “*xls_read_and_ROC.m*”, pode-se obter um mapa de falsos-positivos e falsos-negativos (mapa de deteções) por meio do programa “*xls_read_and_plot_class_decisions.m*”. Nesse programa, a deteção é baseada na relação sinal/ruído, que é comparado com o valor correspondente do SNR_thresh. Para a cavitação estável usaremos os valores da coluna “eff_u1” e compararemos com o SNR_thresh correspondente, que neste caso (Table 5.3) é SNR_thresh(4)=0.6, para classificar (decisão do algoritmo) como “Positivo” ou “Negativo”. Será classificado pelo algoritmo como “Positivo” se $S > \text{SNR_thresh}$ e “Negativo” caso contrário, e comparado com o “ground truth”. Desse modo, há a possibilidade de erros de classificação do tipo: a) FP (quando o algoritmo indicar “Positivo” erroneamente); b) FN (quando o algoritmo indicar “Negativo” erroneamente); c) TP (quando o algoritmo indicar “Positivo” corretamente); d) TN (quando o algoritmo indicar “Negativo” corretamente).

O programa “*xls_read_and_plot_class_decisions.m*” marca as deteções verdadeiras na cor verde e as falsas na cor vermelha, as positivas com “+” e as negativas com “o”, resultando em 4 padrões: TN com “o verde”; FN com “o vermelho”; TP com “+ verde”; e FP com “+ vermelho” . A Figure 3.1 ilustra para o caso da deteção da cavitação estável, na qual os eixos horizontais representam os valores de K0 e os eixos verticais os valores de IO para cada sinal gerado. Portanto, os mapas sintetizam a capacidade de deteção para o critério proposto para as variáveis (K0,IO).

Analogamente, para a cavitação inercial, porém analisando em 3 bandas, “eff1”, “eff_i2” e “eff_i3” com o intuito de verificar qual deles é melhor para o inercial. Portanto, neste caso teremos a análise de 4 mapas de deteção: cavitação estável pela faixa f_{u1} ; cavitação inercial pelas faixas f_{i1}, f_{i2} e f_{i3} .

O mapa de deteções depende do “ground truth” e da coluna de classificação (decisão do algoritmo).

Verificação prática do valor de Kmin

Uma forma de verificar ou reajustar, na prática, o valor de Kmin consiste em verificar, no mapa de detecção, a fronteira entre os falso-negativos (FN) e os verdadeiro-positivos (TP) ou entre os FPs e os TPs. A Figure 3.1 ilustra os 2 casos. Na melhor das hipóteses não haverá FN e FP e o Kmin está adequado. Realisticamente, sempre haverá FNs e FPs. Caso o Kmin seja subestimado, haverá uma faixa larga de FNs marcados por “o em vermelho” (desconsidere os valores altos de I0, pois neste momento não interessa o efeito da inercial na estável), e o Kmin deve ser aumentado para a fronteira entre os FNs e TPs. Lembrando que o critério para o “ground truth” estabelece que a cavitação ocorreu caso $K_0 \geq K_{min}$, na Figure 3.1.a o valor de Kmin deve ser reajustada para a coluna posterior à última coluna com muitos FNs, no caso, $K_{min}=0.035$, enquanto na Figure 3.1.b (Kmin foi superestimado), o valor de Kmin deve ser reajustada para a primeira coluna com muitos FPs, $K_{min}=0.035$.

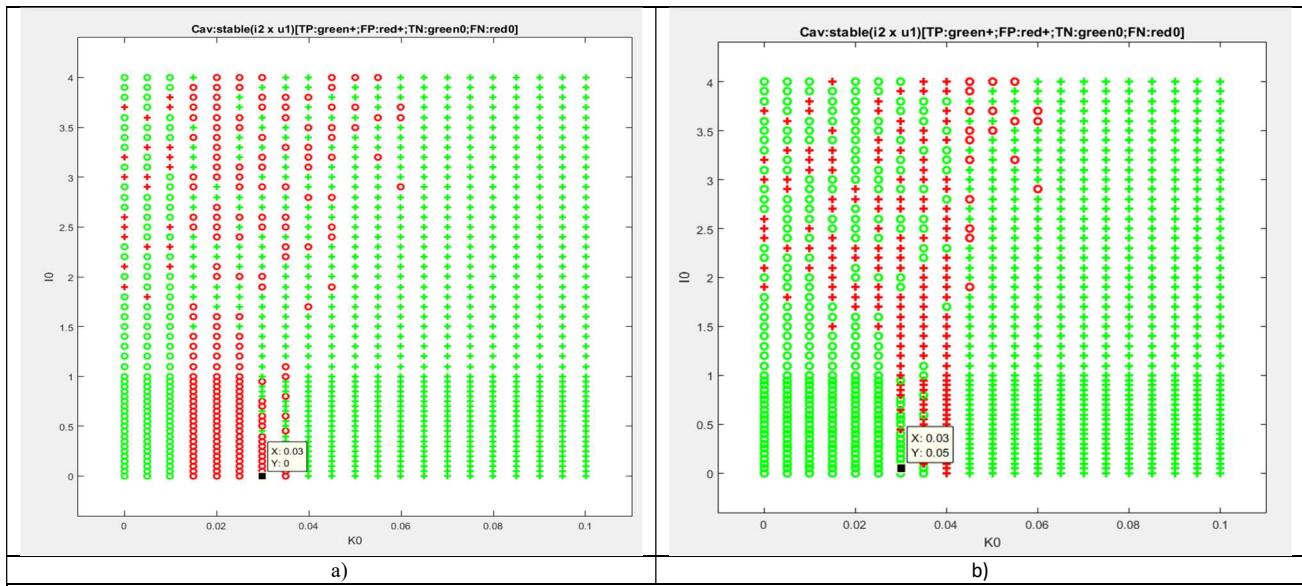


Figure 3.1 Mapas de detecção da cavitação estável para verificação dos valores de Kmin. a) caso de Kmin subestimado com muitos FNs; b) caso de Kmin superestimado com muitos FPs. (obtido por `xls_read_and_plot_class_decisions..m`)

Portanto, o procedimento para verificar/reajustar o valor de Kmin é:

1. Usar o valor teórico de Kmin = per_noise (nível de ruído);
2. Gerar vários sinais variando o par (K_0, I_0) no entorno de Kmin, incluindo $K_0=0$, e obter a ROC;
3. Obter o mapa de deteções usando o melhor limiar retornado pelo ROC ($S_{min_FP_FN}$) e realizar a análise descrita acima das fronteiras de FN/TP e TN/FP (Figure 3.1).

Procedimento semelhante será aplicado para a determinação do Imin.

4. Detecção de eventos com receptor de banda estreita

O objetivo principal desse trabalho é verificar a possibilidade de se utilizar os próprios transdutores de pressão do tipo PZT para detectar a ocorrência das cavitações. Portanto, iremos realizar primeiro as avaliações para receptores de banda estreita e, posteriormente, para efeito de comparação, com receptores de banda larga.

De acordo com o capítulo anterior, teremos de realizar os seguintes passos:

1. Definir as características do receptor, das medidas e dos sinais
 - a. Obter as tabelas de atenuação do receptor em função da frequência
2. Estimar o limiar ($\text{SNR_thresh}(f_{xx})$) para cada banda de interesse
3. Efeito de eventos nas demais bandas
 - a. Obter o efeito do eco nas demais bandas
 - b. Obter o efeito da cavitação estável nas demais bandas
 - c. Obter o efeito da cavitação inercial nas demais bandas
4. Definir os critérios de deteção da cavitação estável e da cavitação inercial
5. Determinar os valores efetivos de K_{\min} e I_{\min}
 - a. Criar um conjunto de sinais com (K_0, I_0) próximos aos valores esperados de K_{\min} e I_{\min}
 - b. Calcular o SNR de cada banda de interesse
 - c. Obter a ROC e o mapa de deteções para reajustar K_{\min} e $I_{\min}()$.
6. Ampliar o conjunto de sinais para avaliação dos detectores
 - a. Obter as ROCs e AUCs
7. Realizar as análises e indicar as conclusões.

Características do receptor de banda estreita

Há uma grande variedade de transdutores com características distintas. Para efeito de análise, iremos nos ater a um transdutor com as características apresentadas na seção “Resposta em frequência do receptor”. Portanto, conclusões com outros tipos de receptores de banda estreita precisam ser devidamente adaptadas e consideradas.

Em resumo, as principais características do receptor são:

- Transdutor do tipo piezoelétrico, cilíndrico, com diâmetro igual a 10.15 mm
- Frequência central, $f_0 = 250 \text{ kHz}$
- Banda de frequência de 100% a -6 dB, i.e., BW=250 kHz
- Atenuação em relação à frequência central (reproduzida abaixo)

Receptor (RX)	f_{l0}	f_0	f_{l1}	f_{u1}	f_{l2}	f_{l3}	f_{u2}
Atenuação(dB)	-1.6	0.0	-1.6	-5.7	-13.4	-38.1	-53.4

Características dos sinais

Os sinais gerados pelo meio, em resposta a estímulos ultrassônicos, podem ter, além do ruído, fontes acústicas do tipo: eco, cavitação estável e cavitação inercial. As amplitudes de cada evento são controladas por meio dos parâmetros [E_0 , K_0 , I_0 , per_noise], conforme especificados pelas equações (Eq. 3.1) e (Eq. 3.2).

A duração do pulso transmitido de excitação é de 7 ciclos com envelope do tipo Gaussiano.

O nível de ruído adotado será de 2% da faixa dinâmica do sinal ou da saída do amplificador do receptor, qual for a maior. A faixa dinâmica da saída do amplificador foi fixada em 102 u.a (unidade arbitrária).

Características das medidas

O intervalo de amostragem é da ordem de $dt=69.1\text{ ns}$, implicando em frequência de amostragem de $fa = 14.47\text{ MHz}$. O número de amostras temporais é da ordem de $N=2257$, portanto a resolução do espectro é aproximadamente $\delta_f = \frac{14.47\text{MHz}}{2257} = 6.4\text{ kHz}$.

Suposto meio homogêneo (água); Nyquist frequency: 1386.0 kHz; Filter cut-off =924.0 kHz.

Uma vez obtidos os sinais coerentes e os respectivos espectros de amplitude, torna-se necessário realizar “medidas” do tipo SNR para cada faixa de frequência de interesse.

As bandas de frequência que iremos analisar, a princípio, são aquelas contidas na tabela acima.

Para cada banda, o SNR será a média do SNR no intervalo definido pelos parâmetros $[FL,FR]=[0.5; 0.5]$, onde os limites de cada faixa são obtidos por:

$$\left[f_c - F_L * \frac{f_0}{8}; f_c + F_R * \frac{f_0}{8} \right]; f_c: \text{frequência central da banda}$$

Na prática, a banda terá extensão de $\frac{f_0}{8} = 31.2\text{ kHz}$, resultando em aproximadamente $\frac{31.2}{6.4} = 4.8$; ou seja, 4 amostras do espectro por banda. Com o intuito de aumentar a resolução, foi empregada a interpolação em frequência por meio de “zero-padding” no tempo. Com isso, no caso de $[FL, FR]=[0.50; 0.50]$, foram consideradas 26 amostras em frequência para cada banda.

Estimativa do limiar para cada banda (SNR_thresh): receptores de banda estreita

Conforme mencionado nas equações anteriores, o *SNR_thresh* desempenha um papel importante na deteção dos eventos. Seria conveniente que ele fosse o mesmo para todas as bandas, mas infelizmente não é constante, pois o espectro do ruído é alterado pela resposta em frequência do receptor (RX). Por outro lado, conforme descrito na seção “Estimativa do ruído: transdutores de banda estreita”, o nível de ruído é determinado no tempo e é um único valor para todo o sinal. Desse modo, é natural que a referência (*SNR_thresh*) para a detecção varie com a banda.

Iremos determinar o *SNR_thresh* experimentalmente, i.e., apenas coletando o ruído e determinando a SNR para cada banda, pois esta abordagem permite considerar também as atenuações decorrentes do receptor e do meio.

Como o sinal é composto apenas por ruído, e para manter a mesma faixa dinâmica, impusemos a faixa dinâmica que ocorre para o eco ($E0=1$), correspondente ao valor $\text{refRange}=1.02\text{e+02}$.

Verificamos que os valores de SNR variam muito com mesma configuração devido à aleatoriedade do ruído. Desse modo, optamos por usar a média dentro da banda para definir o *limiar*, ressaltando que os valores medidos, e que serão comparados com o *SNR_thresh*, são valores médios na banda para evitar o efeito das bordas de eventos nos espectros.

A Table 4.1 mostra os valores de SNR (Pico, na frequência central, e médio) obtidos em cada banda com $[FL,FR]=[0.5;0.5]$ para ruído de 2% e $[E0;K0;I0]=[0;0;0]$ (i.2.0), e os valores de SNR acrescidos de 6 dB formando o *SNR_thresh*. Pretendemos utilizar estes valores de *SNR_thresh*(6dB) de cada banda como limiar para a detecção dos eventos correspondentes.

Os valores esperados para o SNR médio seriam em torno de 0 para receptores de banda larga. Devido aos receptores de banda estreita, notam-se que os SNR decaem para frequências distantes de f_0 . Os valores de SNR são superestimados de um modo geral, pois a referência (noise) é subestimada conforme descrito em “Estimativa do nível espectral do ruído”, como pode ser percebido nas faixas entre f_{l0} e f_{u1} . No entanto, quando se calcula o SNR para sinais com eventos e ruído, os valores obtidos também são superestimados de montante similar. Portanto, é razoável usar os *SNR_threshold* de cada banda como limiares.

Detalhes da obtenção desses valores estão no relatório detalhado do repositório institucional.

Table 4.1. Valores de SNR e SNR_threshold para cada banda com [FL,FR]=[0.5;0.5] para ruído de 2% e [E0;K0;IO]=[0;0;0] (mainSonoTrombolise.m; opção i.2.0)

dB	f_{i0}	f_0	f_{i1}	f_{u1}	f_{i2}	f_{i3}	f_{u2}
SNR freq. central	7.0	3.1	5.7	4.2	0.4	-19.4	-26.4
SNR pico (máx)	9.1	6.7	11.0	8.2	1.3	-17.9	-23.7
SNR médio	6.6	5.2	4.4	4.7	-1.6	-20.7	-25.5
SNR_thresh(6dB)	12.6	11.2	10.4	10.7	4.4	-14.7	-19.5

Efeito do eco no SNR das demais faixas: receptor de banda estreita

O sinal do eco pode interferir nas demais bandas em função do seu espectro e da resposta em frequência do receptor. Torna-se, portanto, importante quantificar o seu efeito e notar que esse efeito é dependente do número de ciclos do pulso transmitido e da banda do receptor.

Os parâmetros utilizados para os sinais e medidas foram: [E0,K0,IO]=[1.00; 0.00; 0.00]; per_noise= 0.02; nCiclos=7; BW(-6dB)=100%; [FL,FR]=[0.50; 0.50].

A Figure 4.1 mostra o espectro do eco para receptores com banda estreita (-6 dB), com ruído a 2%, e em dB (ref.: ruído medido), e a Table 4.2 mostra os valores da SNR nas demais bandas. Nota-se que o eco tem efeito significativo (em torno de -15 dB) nas bandas vizinhas { f_{i0} ; f_{i1} }, tornando difícil usar estas bandas para deteção da cavitação inercial. Esta tabela mostra também o impacto do eco nas demais bandas (attE(f)), i.e., na presença do eco, o valor de attE(f) deve ser somado ao S(f_0) para estimar o impacto do eco em cada banda.

Os valores obtidos de SNR (médio em 26 amostras em frequência) para as bandas de interesse, [f_{i0} f_0 f_{i1} f_{u1} f_{i2} f_{i3} f_{u2}]=[187.50 250.00 312.50 375.00 437.50 562.50 625.00]kHz foram:

[S_{i0} S_0 S_{i1} S_u S_{i2} S_{i3} S_{u2}] = [32.7 47.5 33.4 -0.6 -6.0 -18.8 -23.9]dB (ref.:noiseRef) , onde noiseRef=5.96e-03 (unidades do espectro de amplitude; denominador do SNR).

Detalhes dessa simulação estão no no relatório detalhado do repositório institucional.

Table 4.2. Efeito do eco nas demais bandas. Valores de SNR médio e relativo ao eco para cada banda com [FL,FR]=[0.5;0.5] para ruído de 2% e [E0;K0;IO]=[1;0;0] (mainSonoTrombolise.m; opção i.2.0)

dB	f_{i0}	f_0	f_{i1}	f_{u1}	f_{i2}	f_{i3}	f_{u2}
SNR médio	32.7	47.5	33.4	-0.6	-6.0	-18.8	-23.9
attE(f)=SNR(f)-SNR(f0)	-14.8	0	-14.1	-48.1	-53.5	-66.3	-71.4

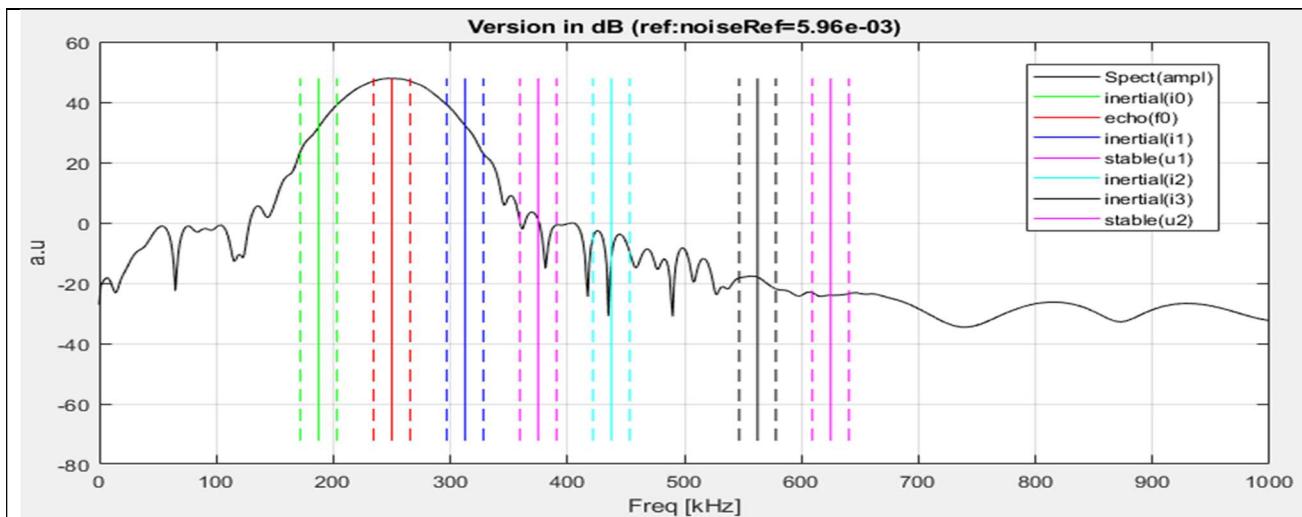


Figure 4.1. Espectro de amplitude em dB do eco na presença do receptor (freq. central em 250 kHz, banda de 100%). Foi aplicado o janelamento de Hann. As bandas de cada evento foram de $[0.50 \ 0.50]*f_0/8$. O dB médio foi calculado em relação ao nível de ruído medido. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v4.03;i.2.0)

De forma similar foram determinados os efeitos da cavitação estável e da cavitação inercial nas demais bandas. Os resultados estão resumidos na Table 4.3.

Critérios para detectar cavitação estável: receptor de banda estreita

O objetivo desta seção é estabelecer critérios para a deteção de cavitação estável na presença de eco, cavitação inercial e ruído.

A Table 4.3 resume os impactos dos eventos {eco, cavitação estável e cavitação inercial} nas demais bandas a partir das tabelas anteriores, incluindo os valores dos limiares, SNR_thresh(f) e a atenuação causada pelo receptor attRX(f).

Table 4.3. Impacto dos eventos nas demais bandas, atenuação devido ao receptor e limiar para a deteção a 6 dB. Obtidos para [FL,FR]=[0.5;0.5]; ruído de 2% (mainSonoTrombolise.m; opção i.2.0)

dB	f_{i0}	f_0	f_{i1}	f_{u1}	f_{i2}	f_{i3}	f_{u2}
attRX(f)	-1.6	0.0	-1.6	-5.7	-13.4	-38.1	-53.4
attE(f)	-14.8	0	-14.1	-48.1	-53.5	-66.3	-71.4
attU(f)	-33.9	-35.5	-9.4	0	-21.9	-61.7	-66.5
attI2(f)	11.7	12.4	12.2	6.3	0	-23.0	-28.2
SNR_thresh(6dB)	12.6	11.2	10.4	10.7	4.4	-14.7	-19.5

Percebe-se a necessidade de se descontar o efeito dos eventos vizinhos à faixa fu1 por meio da (Eq. 3.8). Como o eco pode ter elevada intensidade, vamos considerar o seu impacto apesar da elevada atenuação (-48.1 dB). Deve-se também remover a influência do inercial em fu1, em torno de 6.3 dB.

Aplicando a (Eq. 3.8) e impondo que seja maior do que SNR_thresh(6dB), temos:

$$S_u - \max\{S_0 + att_E(f_u); 0\} - \max\{S_{i2} + att_{i2}(f_u); 0\} > 6 \text{ dB}$$

Onde o operador $\max\{\text{arg1}; \text{arg2}\}$ retorna o maior entre {arg1; arg2}.

Como,

$$att_E(f_u) = -48.1 \text{ (dependente do receptor RX e do formato do sinal de eco)}$$

$$att_{i2}(f_u) = 6.3 \text{ (dependente do RX)}$$

Assim, o critério para que um evento na frequência f_u seja considerado como cavitação estável para o RX definido:

$S_u - \max\{S_0 + att_E(f_u); 0\} - \max\{S_{i2} + att_{i2}(f_u); 0\} > SNR_thresh(f_u)$ $S_u - S_{i2} > 3 \text{ dB; (elevação da amplitude central)}$ $att_E(f_u) = -48.1 \text{ (dependente do RX e do formato do sinal de eco)}$ $att_{i2}(f_u) = 6.3$	(Eq. 4.1)
---	--

Para efeito de exemplo, vamos acrescentar ao caso do eco (Figure 4.1) com ruído, um evento do tipo ultra-harmônica com amplitude $K_0 = 0.10$.

A Figure 4.2 mostra o espectro resultante para a condição [E0 K0 I0] = [1.000 0.100 0.000], mantendo as demais condições anteriores, na qual se nota a elevação da amplitude na região do f_u . Os valores obtidos de SNR:

$$[S_{i0} \ S_0 \ S_{i1} \ S_u \ S_{i2} \ S_{i3} \ S_{u2}] = [33.3 \ 48.2 \ 33.4 \ 20.7 \ -0.5 \ -22.9 \ -24.4] \text{ dB}$$

Aplicando os critérios da (Eq. 4.1),

$$S_u - \max\{S_0 + att_E(f_u); 0\} - \max\{S_{i2} + att_{i2}(f_u); 0\} > SNR_thresh(f_u)$$

$$20.7 - \max\{-48.2 - 48.1; 0\} - \max\{-0.5 + 6.3; 0\} > 10.7$$

$$20.7 - 0.1 - 5.8 > 10.7$$

$$14.8 > 10.7 \text{ o que é verdadeiro.}$$

Indicando a ocorrência da cavitação estável, e neste caso um verdadeiro-positivo (TP).

É de se esperar que, para cada nível de ruído (ou faixa de ruído), haja um limiar de K0 ($K_{min}(\text{nívelRuído})$) abaixo do qual não é possível detectar a cavitação (FN: falso negativo), mesmo a cavitação estando presente. Por outro lado, mesmo sem a presença da cavitação, é possível que o detector indique a cavitação (FP: falso positivo) a partir de um nível de ruído para o critério aplicado.

Estas considerações também se aplicam na detecção da cavitação inercial. Estes aspectos de avaliação serão discutidos nas próximas seções.

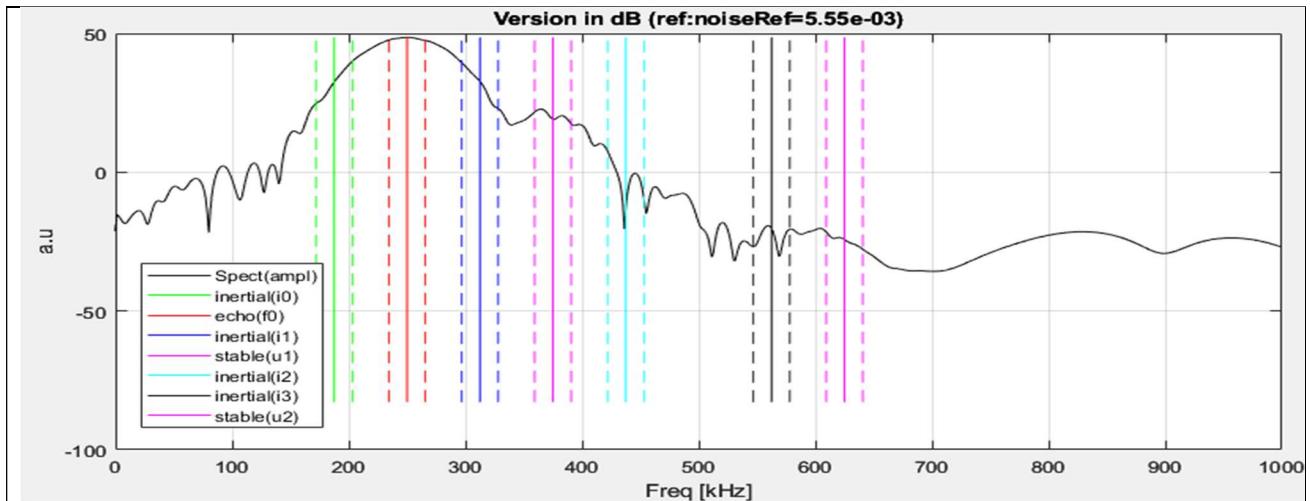


Figure 4.2. Espectro de amplitude em dB(em relação ao nível de ruído medido) na presença do receptor (freq. central em 250 kHz, banda de 100%); com eco(*nCiclos*=7) e cavitação estável, [E0 K0 I0 Per_N]=[1.000 0.100 0.000 0.020]; bandas de cada evento foram de [0.50 0.50]**f*0/8. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v4.03;i.2.0)

Critérios para detectar cavitação inercial: receptor de banda estreita

A cavitação inercial é difícil de se detectar usando banda estreita, pois: a) tem espectro de banda larga e se confunde com o ruído; b) é fortemente atenuado fora da banda estreita do receptor; c) o seu espectro sofre forte influência do eco (Figure 4.1) e da ultra-harmônica.

A sua distinção em relação ao ruído se dá pela relação sinal/ruído, na qual o nível do ruído foi estimado em janela temporal após o ROI, conforme discutido anteriormente.

Analisaremos 4 bandas de frequência para tentar detectar a cavitação inercial: f_{i0} ; f_{i1} ; f_{i2} e f_{i3} (Eq. 3.3). A Table 4.3 mostra que: i) as bandas f_{i0} e f_{i1} são afetadas significativamente pelo eco ($\text{att}_E(f_{i0})$ e $\text{att}_E(f_{i1})$); ii) a banda f_{i1} também é afetada de modo significativo pela primeira ultra-harmônica ($\text{att}_U(f_{i1})$); iii) a faixa f_{i3} é muito atenuada pelo receptor ($\text{att}_{RX}(f_{i3})=-38.1$ dB). Portanto, espera-se que a banda com melhores condições para a detecção da cavitação inercial é a f_{i2} .

Nota-se que a faixa de f_{i2} é afetada pela ultra-harmônica (-21.9 dB) e que deverá ser compensado para detecção da inercial.

Similarmente à detecção da cavitação estável, aplicando-se na faixa de f_{i2} a (Eq. 3.8), na qual o evento Y é a cavitação inercial / na banda f_{i2} e o evento X é o eco na banda f_0 , temos:

$$S(f_{i2}) - \max\{S(f_0) + \text{att}_E(f_{i2}); 0\} > \text{SNR_thresh}(f_{i2})$$

Contudo, a cavitação estável pode também ser intensa e devemos descontar o seu efeito, que corresponde ao calculado na (Eq. 4.1), ou seja, o SNR efetivo da ultra-harmônica na banda f_u é:

$$Seff(f_u) = S_u - \max\{S_0 + \text{att}_E(f_u); 0\} - \max\{S(i2) + \text{att}_{i2}(f_u); 0\}$$

Portanto, considerando o desconto total, tem-se o critério para detectar a cavitação inercial:

$$Seff(f_u) = S(f_u) - \max\{S(f_0) + \text{att}_E(f_u); 0\} - \max\{Seff(f_u) + \text{att}_U(f_{i2}); 0\} > \text{SNR}_{\text{thresh}}(f_{i2}) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

$$Seff(f_u) = S(f_u) - \max\{S(f_0) + \text{att}_E(f_u); 0\} - \max\{S(f_{i2}) + \text{att}_{i2}(f_u); 0\}$$

$$\text{att}_E(f_{i2}) = -53.5 \text{ dB}; \text{(dependente do formato do eco e do receptor)}$$

$$\text{att}_E(f_u) = -48.1 \text{ dB};$$

$$\text{att}_{i2}(f_u) = -21.9 \text{ dB}$$

$$\text{att}_{i2}(f_u) = 6.3 \text{ dB}$$

$$\text{SNR}_{\text{thresh}}(f_{i2}) = 4.4 \text{ dB};$$

Para exemplificar, aplicaremos esse critério no exemplo da Figure 4.2, que contém a cavitação estável, mas não a inercial. Espera-se que o critério indique a inexistência da cavitação inercial. Nesse caso, conforme obtido na seção anterior, $S_{eff}(f_u) = 14.8$. Substituindo os demais valores, temos:

$$S_{eff}(f_{i2}) = S(f_{i2}) - \max\{S(f_0) + att_E(f_{i2}); 0\} - \max\{S_{eff}(f_u) + att_U(f_{i2}); 0\} > SNR_{thresh}(f_{i2})$$

$$S_{eff}(f_{i2}) = -0.5 - \max\{48.2 - 53.5; 0\} - \max\{14.8 - 21.9; 0\} > 4.4$$

$$S_{eff}(f_{i2}) = -0.5 - 0 - 0 > 4.4$$

resultando em afirmação falsa, ou seja, indicando a não presença da cavitação inercial, como esperado (TN).

Um outro exemplo, agora inserindo a cavitação inercial com $I0=2.00$ no exemplo anterior, espera-se que o detector indique a presença da inercial. A Figure 4.3 mostra o espectro resultante para a condição $[E0 K0 I0] = [1.000 0.100 2.000]$, mantendo as demais condições anteriores, na qual se nota a elevação da amplitude na região do f_{i2} . Os valores obtidos de SNR:

$$[S_{i0} S_0 S_{i1} S_u S_{i2} S_{i3} S_{u2}] = [31.8 \ 47.9 \ 34.3 \ 21.3 \ 5.9 \ -17.0 \ -22.7] dB$$

Aplicando os critérios (Eq. 4.2), tem-se:

$$S_{eff}(i2) = S(f_{i2}) - \max\{S(f_0) + att_E(f_{i2}); 0\} - \max\{S_{eff}(f_u) + att_U(f_{i2}); 0\} > SNR_{thresh}(f_{i2})$$

Onde,

$$S_{eff}(f_u) = S(f_u) - \max\{S(f_0) + att_E(f_u); 0\} - \max\{S(f_{i2}) + att_{I2}(f_u); 0\}$$

$$S_{eff}(f_u) = 21.3 - \max\{47.9 - 48.1; 0\} - \max\{5.9 + 6.3; 0\}$$

$$S_{eff}(f_u) = 21.3 - 0 - 12.2 = 9.1$$

Portanto,

$$S_{eff}(i2) = 5.9 - \max\{47.9 - 53.5; 0\} - \max\{9.1 - 21.9; 0\} > 4.4$$

$$S_{eff}(i2) = 5.9 - 0 - 0 > 4.4$$

Resultando em sentença verdadeira, indicando a presença de cavitação inercial, como esperado, sendo, portanto, um verdadeiro-positivo (TP). Mas, decrescendo-se o valor de $I0$, mesmo antes de atingir 0, o detector não será capaz de acusar a cavitação inercial, resultando em falsos-negativos, devido a: i) presença do ruído; ii) efeito da banda estreita do receptor; iii) critério deficiente.

Nas próximas seções, serão investigados os valores mínimos de $K0$ e $I0$ ($Kmin$, $Imin$) para banda estreita, abaixo dos quais não é possível detectar os eventos. Isso é importante para estabelecer os “ground truths” para as avaliações.

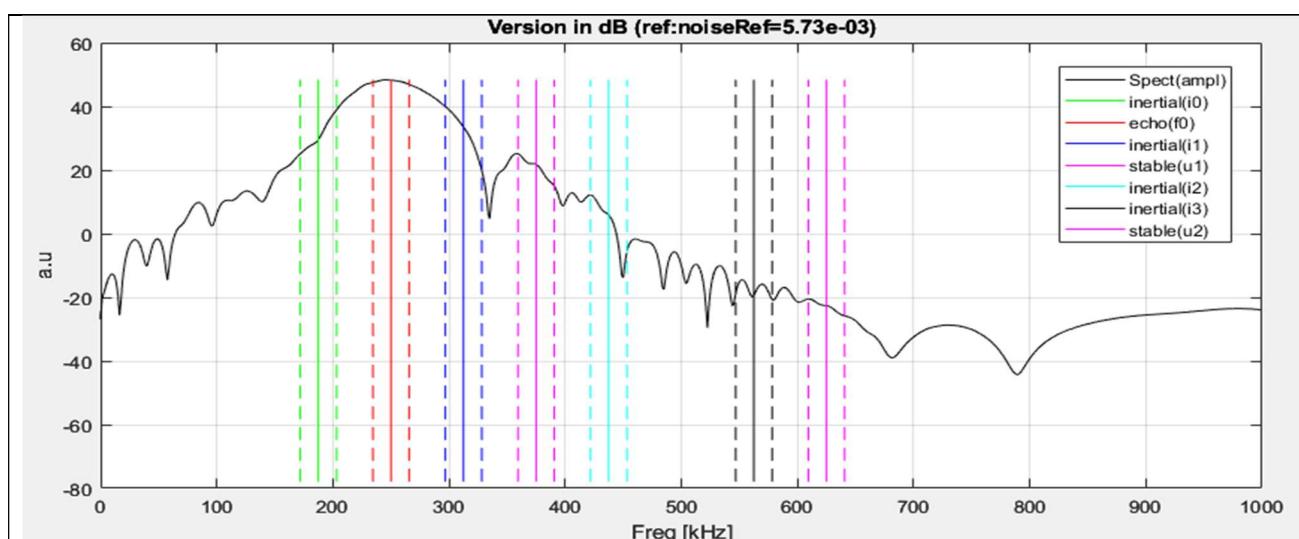


Figure 4.3. Espectro de amplitude em dB(em relação ao nível de ruído medido) na presença do receptor (freq. central em 250 kHz, banda de 100%); com eco($nCiclos=7$), cavitação estável e cavitação inercial, $[E0 K0 I0 Per_N] = [1.000 0.100 2.000 0.020]$; bandas de cada evento foram de $[0.50 0.50]*f0/8$. (obtido via mainSonoTrombolise.m, v4.03;i.2.0)

Determinação do Kmin e Imin: receptor de banda estreita

Segundo o procedimento descrito em “Amplitude mínima detectável da cavitação para um nível de ruído”, foram obtidos os valores $K_{min}=0.06$ e o $I_{min}=1.7$ (para f_{i2}).

Geração de banco de sinais para avaliação: receptor de banda estreita

Estimados os valores de K_{min} e I_{min} , geramos 832 sinais correspondentes aos pares (K_0, I_0). Vale ressaltar que uma vez tendo os valores de SNR para cada faixa, poderemos alterar as outras colunas da planilha, como os referentes a valores efetivos (dependente de critério), bem como dos limiares e realizar novas avaliações sem ter de gerar novos sinais, apenas por comandos do excel.

Nessa geração, foi requerido em torno de 55 horas do servidor XPS8930 (i7, 64 GB de RAM).

Avaliação dos detetores: receptores de banda estreita

A avaliação dos detetores de cavitações descritos pelas equações (Eq. 4.1) e (Eq. 4.2) foi realizada sobre o banco de sinais gerados na seção anterior. Os parâmetros utilizados foram os mesmos descritos nas seções: *Características do receptor de banda estreita; Características dos sinais; Características das medidas*, resumidos na Table 4.3.

Note que estes critérios envolvem o cálculo do SNR efetivo para as bandas de interesse, no caso $Seff(f_u)$ para a detecção da cavitação estável na banda f_u e $Seff(f_{i2})$ para a cavitação inercial na banda f_{i2} . Estes cálculos dependem das medidas realizadas de SNR em cada banda, bem como de constantes para compensar o crosstalk de outras bandas, como por exemplo o efeito do eco na banda f_u dada por $att_E(f_u)$.

Foram obtidas as ROCs e as respectivas AUCs dos 2 detetores. A Table 4.4 resume os valores obtidos de AUC

Table 4.4. Valores de AUC para os detetores avaliados baseados nas equações (Eq. 4.1) e (Eq. 4.2).

Cav estável	Cav inercial
f_u	f_{i2}
0.9167	0.7552

Nota-se que o detetor de cavitação estável teve um desempenho melhor, com $AUC=0.9167$, enquanto o detetor de cavitação inercial baseado em f_{i2} obteve $AUC=0.7552$. A Figure 4.4 mostra o histograma condicional e a ROC de cada detetor.

Utilizando-se o valor de limiar dado pelo SNR_thresh da Table 4.3 e os valores $K_{min}=0.06$ e $I_{min}=1.7$ obtidos na seção “Determinação do K_{min} e I_{min} : receptor de banda estreita” construímos o mapa de deteção específica para cada detetor, mostradas na Figure 4.5. A Figure 4.5.a mostra que a deteção para cavitação estável (eixo K_0) para baixos valores de I_0 ($I_0<1$) é muito boa. Porém à medida que o valor de I_0 aumenta, surgem os falsos-negativos, indicando que a intensidade da cavitação inercial está inibindo o detetor de cavitação estável, ou seja, o critério está forçando um desconto excessivo no $Seff(f_u)$. Em relação à Figure 4.5.b, para a cavitação inercial (eixo I_0), nota-se o efeito da cavitação estável para $K_0>0.2$, causando falsos-positivos no detetor de inercial. Nesse caso, a cavitação estável está influenciando em excesso o $Seff(f_{i2})$, ou seja, o critério deveria descontar ainda mais a influência da estável.

Estes resultados mostram um comportamento razoável para os detetores propostos, considerando a imposição de se utilizar receptores de banda estreita e em torno da frequência de ressonância dos transmissores (f_0).

Os próximos passos da pesquisa envolveram o aprimoramento do detector visando reduzir os falsos-negativos (FN) e ampliar a faixa de variação de K_0 e I_0 . Os FN ocorrem, provavelmente, porque o limiar ($SNR_thresh(f)$) está muito elevado. Contudo, se diminuirmos demais os limiares, surgirão os FPs.

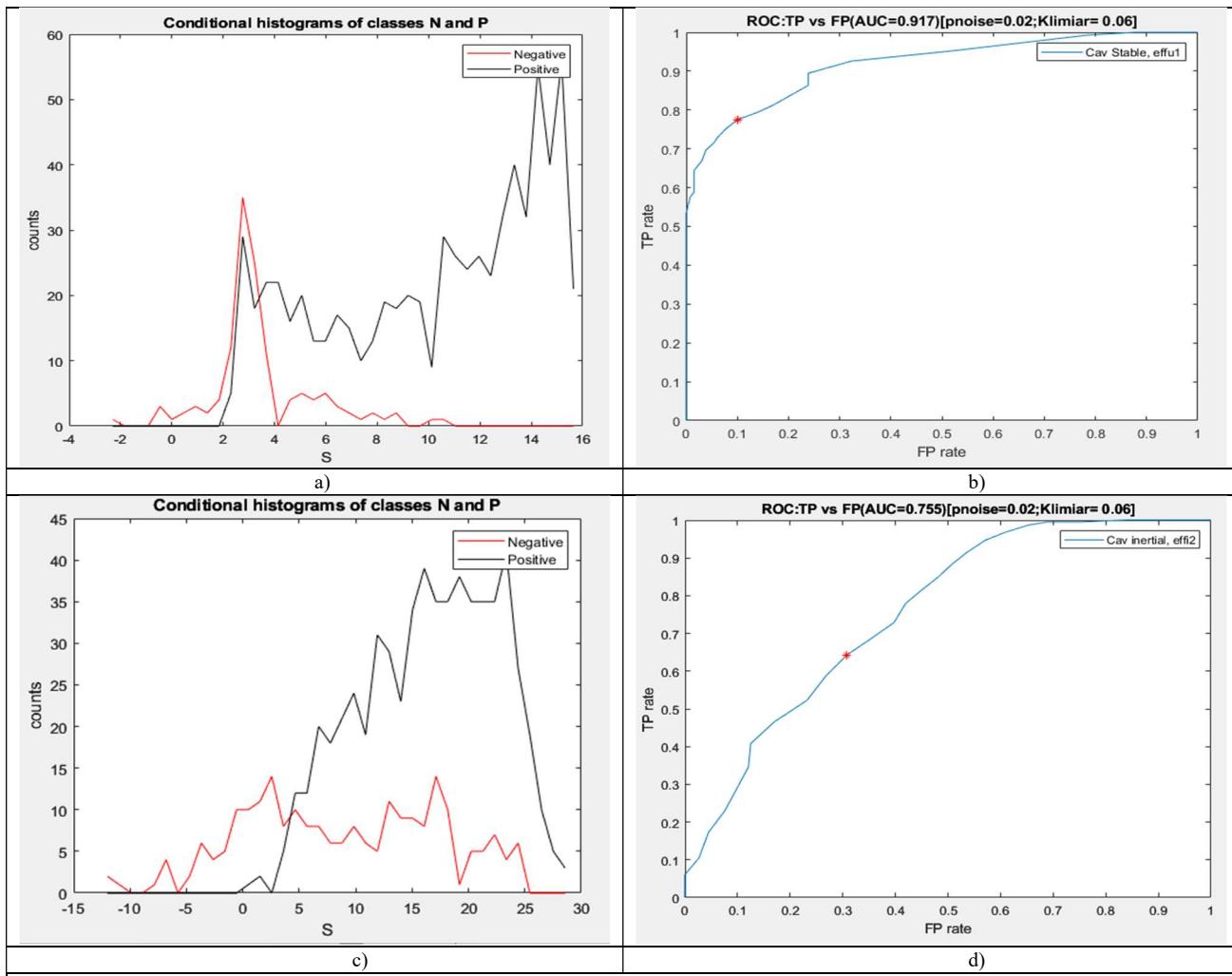


Figure 4.4. Detetor de cavitação estável: a) histograma condicional; b) ROC. Detetor de cavitação inercial (fi2); c) histograma condicional; d) ROC. (obtido por xls_read_and_ROC.m)

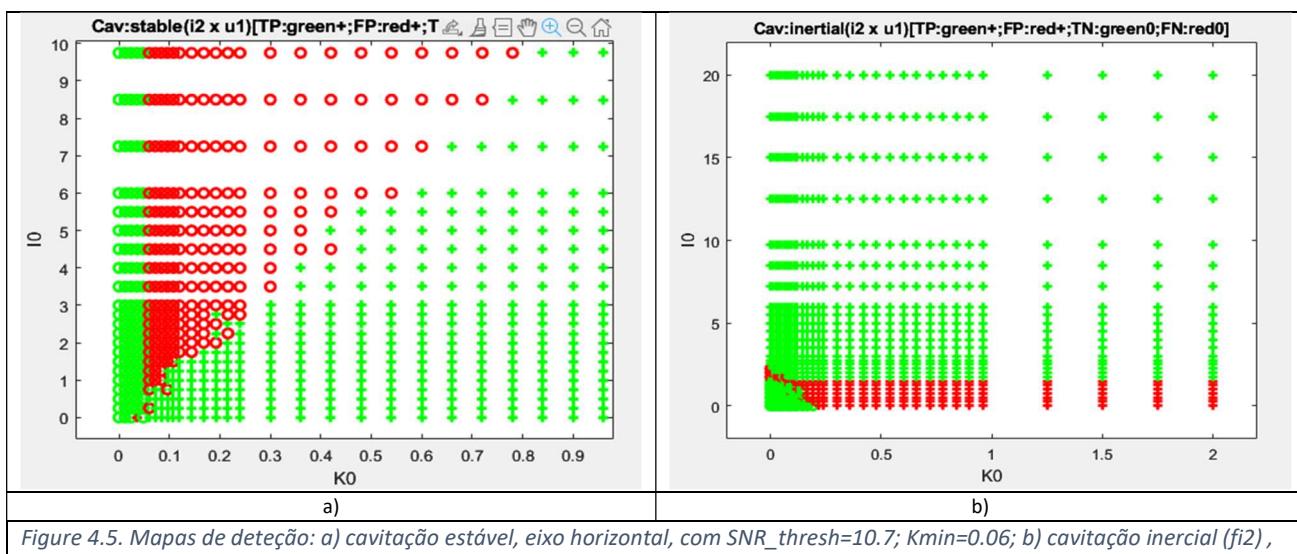


Figure 4.5. Mapas de deteção: a) cavitação estável, eixo horizontal, com SNR_thresh=10.7; Kmin=0.06; b) cavitação inercial (fi2) , eixo vertical, com SNR_thresh=4.4; I2min=1.70. (obtido pelo "xls_read_and_plot_class_decisions.m")

Alternativa: critério 4.03.18 para banda estreita

Após várias investigações e experimentos, estamos propondo um critério alternativo, aprimorado, o critério 4.03.18, que essencialmente busca reduzir o desconto do inercial no detetor de cavitação estável, e aumentar o desconto do estável no detetor de cavitação inercial.

A Table 4.5 resume as alterações nas equações (Eq. 4.1) e (Eq. 4.2) do critério para receptores de banda estreita. Essencialmente, foi diminuído o desconto devido ao inercial na (Eq. 4.1), e aumentado o desconto na (Eq. 4.2). Especificamente,

- Na (Eq. 4.1), o termo $\max \{S(i2) + att_{i2}(f_u); 0\}$ foi alterado para $\max \{S(f_{i2}); 0\}$
- Na (Eq. 4.2), o termo $\max\{Seff(f_u) + att_U(f_{i2}); 0\}$ foi alterado para $\max \{S(f_u) + att_{U1}(f_{i2}); 0\}$

Estas alterações foram realizadas nas planilhas já obtidas, aplicando as regras via comandos do excel para cada registro (832 casos).

Table 4.5. Critério 4.03.18 proposto para detetores de cavitação com receptores de banda estreita

Critério 4_03_18	Receptor de Banda estreita
Cav estável	$Seff(f_u) = S_u - \max\{S_0 + att_E(f_u); 0\} - \max \{S(f_{i2}); 0\} > SNR_thresh(f_u)$ $S_u - S_{i2} > 3 \text{ dB};$ (elevação da amplitude central) $att_E(f_u) = -48.1;$ $SNR_thresh(f_u) = 10.7;$
Cav inercial(f _{i2})	$Seff(i2) = S(f_{i2}) - \max\{S(f_0) + att_E(f_{i2}); 0\} - \max \{S(f_u) + att_{U1}(f_{i2}); 0\} > SNR_thresh(f_{i2})$ $att_E(f_{i2}) = -53.5$ $att_{U1}(f_{i2}) = -21.9$ $SNR_thresh(f_{i2}) = 4.4;$
Cav inercial(f _{i3})	$Seff(i3) = S(f_{i3}) > SNR_thresh(f_{i3})$ $SNR_thresh(f_{i3}) = -14.7;$

Como a ROC é sensível aos valores de Kmin e Imin, verificamos antes se os valores atuais ($Kmin=0.06$; $I2min=1.7$) são adequados para este critério. Aplicando o programa *xls_read_and_plot_class_decisions.m* obtivemos novos mapas (Figure 4.6), donde se conclui que $Kmin=0.048$, $I2min=2.0$, e $I3min=7.50$, resultando em menos FPs, mas mais FN.

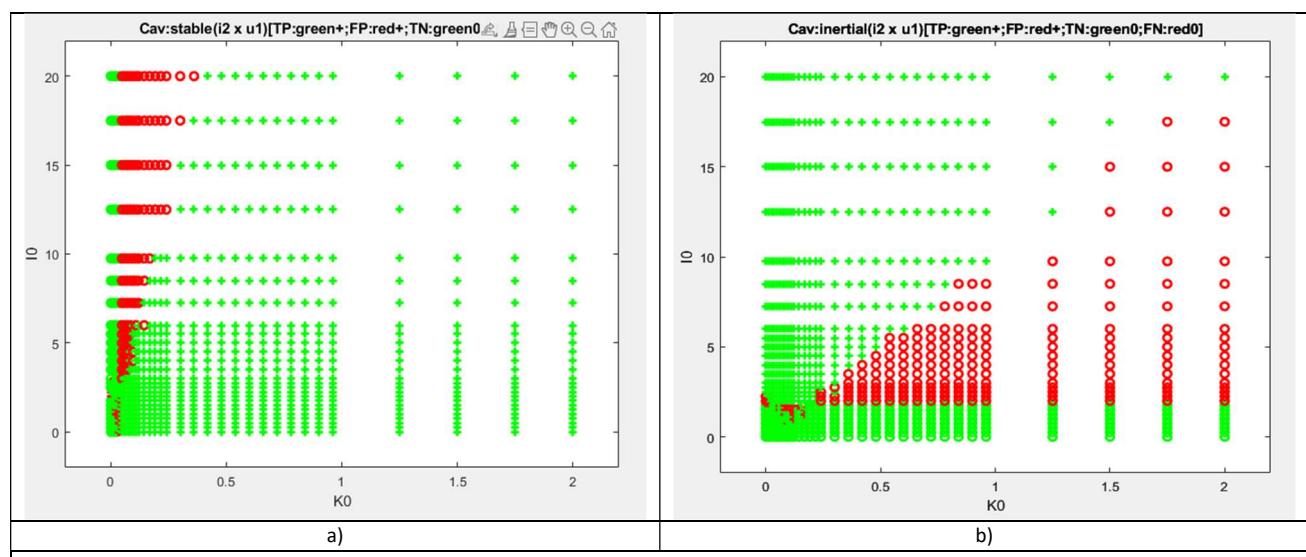


Figure 4.6. Mapas de deteção: a) cavitação estável, eixo horizontal, com $SNR_thresh=10.7$; $Kmin=0.048$; b) cavitação inercial (f_{i2}), eixo vertical, com $SNR_thresh=4.4$; $I2min=2.00$. (obtido pelo “xls_read_and_plot_class_decisions.m”)

A Table 4.6 resume os valores de AUC obtidos e nota-se que os detetores baseados no critério 4.03.18 tiveram desempenhos melhores do que os critérios utilizados na Table 4.4.

Table 4.6. Valores de AUC para os detetores com critério 4.03.18

Cav estável	Cav inercial
fu1	fi2
0.9416	0.9080

Os respectivos mapas de deteção utilizando os limiares com menores falsos-positivos e falsos-negativos ($S_{\min_FP_FN}$) de cada detetor são mostrados na Figure 4.7.

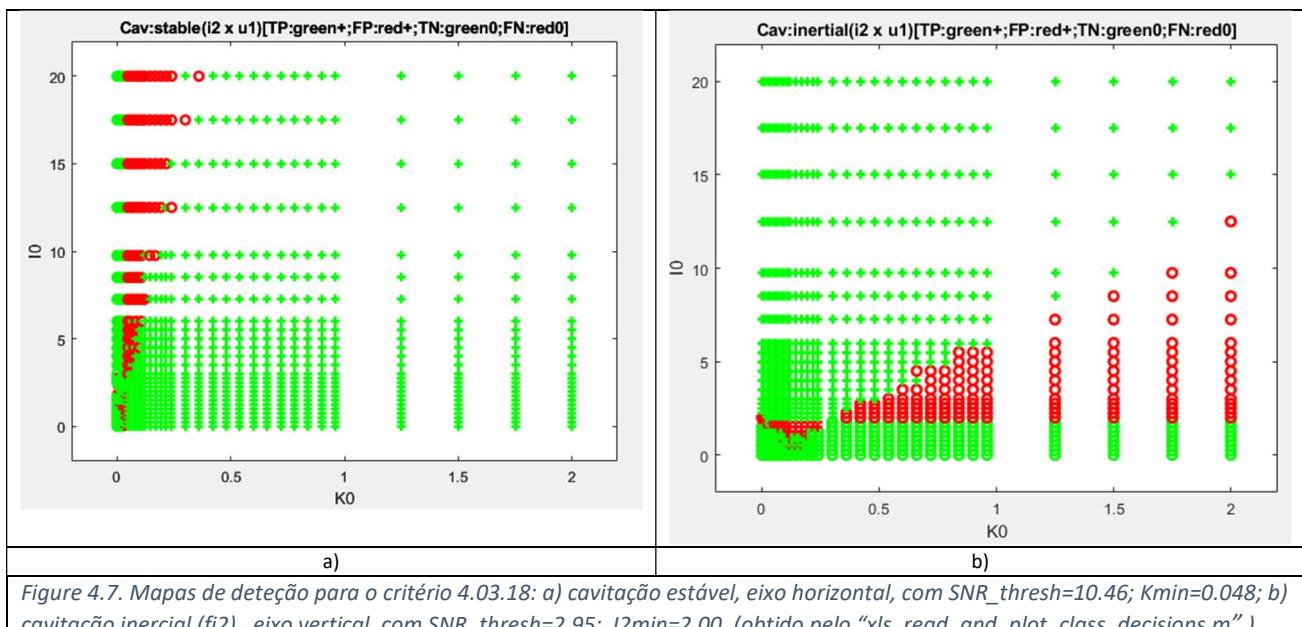


Figure 4.7. Mapas de deteção para o critério 4.03.18: a) cavitação estável, eixo horizontal, com $SNR_thresh=10.46$; $Kmin=0.048$; b) cavitação inercial ($fi2$), eixo vertical, com $SNR_thresh=2.95$; $I2min=2.00$. (obtido pelo “xls_read_and_plot_class_decisions.m”)

Conclui-se que houve menos falsos negativos e melhores ROCs com o critério 4.03.18. No entanto, ainda permanecem os efeitos dos outros eventos nos detetores.

A Figure 4.7.a mostra que à medida que se aumenta o valor de $I0$ ocorrem mais FNs, indicando que o desconto do efeito do inercial está ainda elevado no detetor de cavitação estável. A sensibilidade e especificidade do detetor de cavitação estável (AUC=0.9416), para o $SNR_thresh=10.46$, foi de 0.88 e 0.88, respectivamente.

Na Figure 4.7.b, nota-se o efeito da estável no detetor de cavitação inercial: quanto maior o valor de $K0$, maior é o número de FNs, também indicando que o desconto da inercial está excessivo. A sensibilidade e especificidade do detetor de cavitação inercial (AUC=0.9080), para o $SNR_thresh=2.95$, foi de 0.77 e 0.84, respectivamente.

Conclui-se, baseado nas simulações realizadas, que é possível detectar as cavitações estáveis e iniciais ($fi2$) com sensibilidade e especificidade da ordem de 80%.

A questão que surge é o quanto um receptor de banda larga pode melhorar os detetores, que será investigada nas próximas seções.

5. Detecção de eventos com receptores de banda larga

Uma alternativa, embora mais custosa, é utilizar receptores específicos para detectar a cavitação, que suporta frequência superior a segunda harmônica. Pode-se considerar sensores de banda larga ou transdutores semelhantes aos usados para excitação, porém centrados em frequências mais elevadas.

O procedimento para banda larga deve ser modificado nos seguintes pontos em relação ao da banda estreita:

- Manter os transmissores, mas configurar **receptores de banda larga**. Para fins de investigação, podemos usar o mesmo conjunto de transdutores, pois a transmissão depende somente do formato do pulso (amplitude, número de ciclos e frequência).
- **Ajustar os critérios.** Como os critérios não utilizam as atenuações dos receptores, estas tabelas de atenuação e de efeitos devem ser recalculadas.
- Estimar o nível de ruído usando sinal de banda larga para o cálculo de SNR de cada banda
- Para efeito de análise, medir SNR_thresh para E0=K0=I0= 0 e ruído a 2%. Devem ser em torno de 0 para Si2 e Su2
- Simular e avaliar para E0=1; K2=0 e um conjunto grande de pares (K0,I0)

Características do receptor de banda larga

Há uma grande variedade de transdutores com características distintas. Para efeito de análise, iremos nos ater a um transdutor com as características:

- Transdutor do tipo piezoelétrico, cilíndrico, com raio igual a 4.64 mm
- Frequência central, $f_0 = 250 \text{ kHz}$
- Banda de frequência ampla (banda larga)

Características dos sinais e das medidas

As características dos sinais e das medidas são as mesmas relatadas nas seções “*Características dos sinais*” e “*Características das medidas*”.

Estimativa do limiar de SNR para cada banda: receptores de banda larga

A Figure 5.1 mostra o espectro do ruído, i.e., sem nenhum tipo de evento ($E0=K0=I0= 0$ e ruído a 2%). Nota-se que o SNR fica abaixo de 0, conforme esperado. Portanto, teremos 2 possibilidades para o SNR_thresh (f): considerar os valores obtidos ou simplesmente considerar como threshold o valor 0 ou um pouco acima, por exemplo 6dB (dobro de amplitude em relação ao desvio-padrão do ruído). Esta segunda possibilidade pode reduzir os falsos positivos, porém aumentar os falsos negativos.

Os detalhes desse procedimento estão no relatório detalhado do repositório institucional.

A Table 5.1 mostra os valores de SNR médios medidos, bem como outras opções para o limiar de deteção (SNR_thresh), acrescentando-se 3 dB, 6 dB ou então apenas um limiar fixado em 6 dB.

Table 5.1. Valores de SNR_thresh para receptores de banda larga para cada faixa de interesse com ruído de 2%.

SNR_thresh para as bandas [f0 f1 f2 f3 f4]	Observação
[-8.7 -11.0 -10.5 -5.4 -4.4 -8.5 -8.3]	SNR_thresh =SNR medidos
[-5.7 -8.0 -7.5 -2.4 -1.4 -5.5 -5.3]	SNR_thresh =3dB+SNR medidos
[-2.7 -5.0 -4.5 0.6 1.6 -2.5 -2.3]	SNR_thresh= 6dB+valores medidos de SNR
[6.0 6.0 6.0 6.0 6.0 6.0]	SNR_thresh baseado em valores esperados

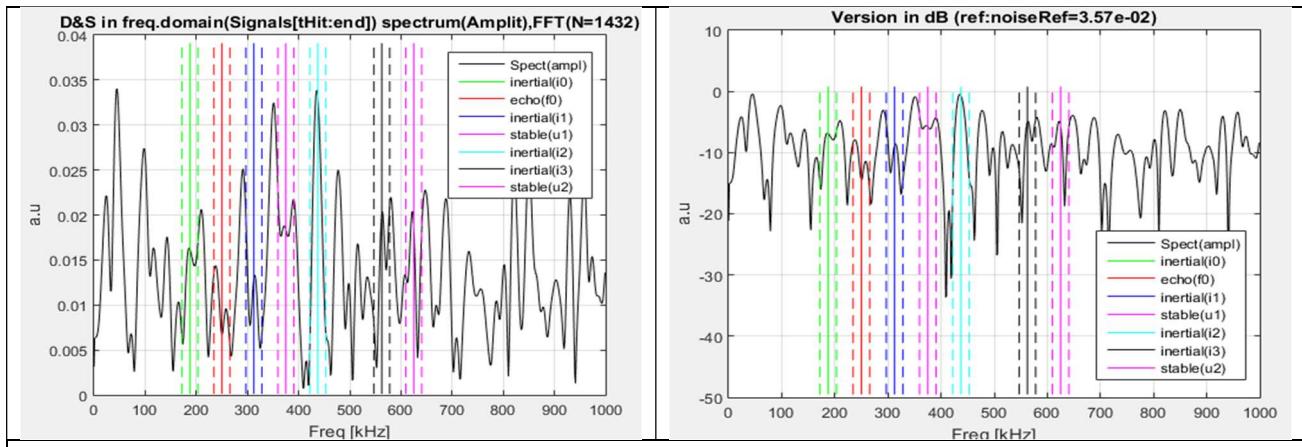


Figure 5.1. a) Espectro do sinal sem eventos, somente ruído a 2%; b) SNR do sinal sem eventos. (obtido com mainSonoTrombolise.m, v4.02, opção j.2.0). [S10 S0 Si1 Si2 Si3 Su2]= [-8.7 -11.0 -10.5 -5.4 -4.4 -8.5 -8.3]; noiseSpect_viaRMS=3.57e-02(=2*noiseRMS/sqrt(N);N=12975);noiseRMS=2.03e+00;noiseSpectAvg=3.17e-02(==noiseSpect_viaRMS?);

Os efeitos do eco, cavitação estável e cavitação inercial nas outras bandas foram determinados seguindo o mesmo esquema descrito anteriormente. A tabela (Table 5.2) mostra os valores relativos do impacto de cada evento nas demais faixas de frequência, bem como os valores medidos de SNR para as configurações testadas.

Table 5.2. Medidas de SNR para receptores de banda larga e o impacto relativo de cada evento nas demais faixas; ruído a 2%.

[E0 K0 IO K2]	[S10 S0 Si1 Su1 Si2 Si3 Su2]	Atenuação relativa (dB)
Eco [1.00 0.00 0.00 0.00]	[19.5 33.2 20.0 -6.1 -5.8 -5.0 -10.5]	Echo_att =[-13.7 0.0 -13.2 -39.3 -39.0 -38.2 -43.7]
Cav estável [0.00 0.50 0.00 0.00]	[-8.5 -8.7 12.2 25.6 10.5 -11.0 -8.0]	Sta_att =[-34.1 -34.3 -13.4 0 -15.1 -36.6 -33.6]
Cav Inercial [0.00 0.00 2.00 0.00]	[5.2 6.0 4.1 2.6 1.7 -1.3 -4.8]	I2_att =[3.5 4.3 2.4 0.9 0 -3.0 -6.5]

Deteção com critério 4.03.18 para banda larga

Conforme mostrado no capítulo “Deteção de eventos com receptor de banda estreita”, o critério 4.03.18 teve melhor desempenho que o critério originalmente proposto. Dessa forma, iremos aplicar e avaliar o critério 4.03.18 nos sinais recebidos com receptor de banda larga e comparar com o de banda estreita.

Os valores das constantes e o critério estão resumidos na Table 5.3 para banda larga, na qual apenas as constantes são alteradas, ou seja, o algoritmo é o mesmo.

Table 5.3. Critérios para detectar as cavitações com as constantes explicitadas para receptores de banda larga. Para a cavitação inercial serão investigadas duas bandas (f_{i2} e f_{i3}).

Critério 4_03_18	Receptor de Banda larga; [f0,f0,f1,fu1,f12,f13,fu2] RXatten =[0 0 0 0 0 0 0] Echo_att =[-13.7 0 -13.2 -39.3 -39.0 -38.2 -43.7] => att _E (f _u) = -39.3; att _E (f _{i2}) = -39.0 Sta_att =[-34.1 -34.3 -13.4 0 -15.1 -36.6 -33.6] => att _{U1} (f _{i2} ; f _u) = -15.1 SNR_thresh =[-2.7 -5.0 -4.5 0.6 1.6 -2.5 -2.3]
Cav estável	Seff(f _u) = S _u - max{S ₀ + att _E (f _u); 0} - max {S(f _{i2}); 0} > SNR_thresh(f _u) S _u - S _{i2} > 3 dB; (elevação da amplitude central) att _E (f _u) = -39.3; SNR_thresh(f _u) = 0.6;
Cav inercial	Seff(f _{i2}) = S(f _{i2}) - max{S(f ₀) + att _E (f _{i2}); 0} - max {S(f _u) + att _{U1} (f _{i2} ; f _u); 0} > SNR_thresh(f _{i2}) att _E (f _{i2}) = -39.0 att _{U1} (f _{i2} ; f _u) = -15.1 SNR_thresh(f _{i2}) = 1.6;
Cav inercial	Seff(f _{i3}) = S(f _{i3}) > SNR_thresh(f _{i3}) SNR_thresh(f _{i3}) = -2.5;

Foram gerados 1071 casos de banda larga para a avaliação.

Como a ROC é sensível aos valores de K_{min} e I_{2min} , verificamos antes se os valores teóricos ($K_{min}=0.02$; $I_{2min}=0.20$) são adequados para este critério. Aplicando o programa `xls_read_and_plot_class_decisions.m` obtivemos novos mapas (Figure 5.2), donde se conclui que $K_{min}=0.035$, $I_{2min}=2.00$, e $I_{3min}=2.30$.

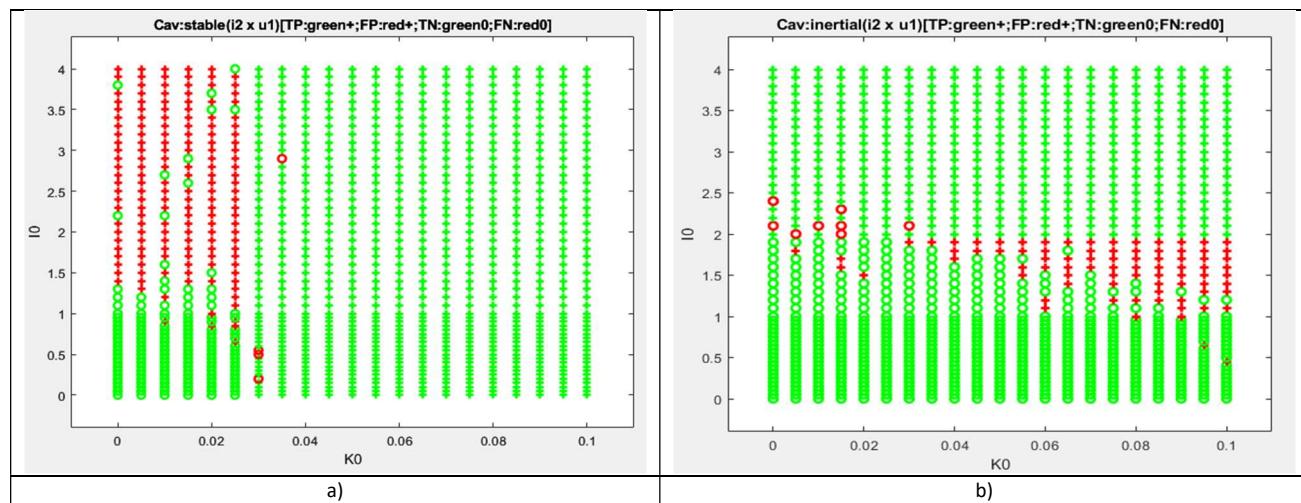


Figure 5.2. Mapas de deteção para banda larga: a) cavitação estável, eixo horizontal, com $SNR_thresh=0.6$; $K_{min}=0.030$; b) cavitação inercial (f_{i2}), eixo vertical, com $SNR_thresh=1.6$; $I_{2min}=2.00$. (obtido pelo “`xls_read_and_plot_class_decisions.m`”)

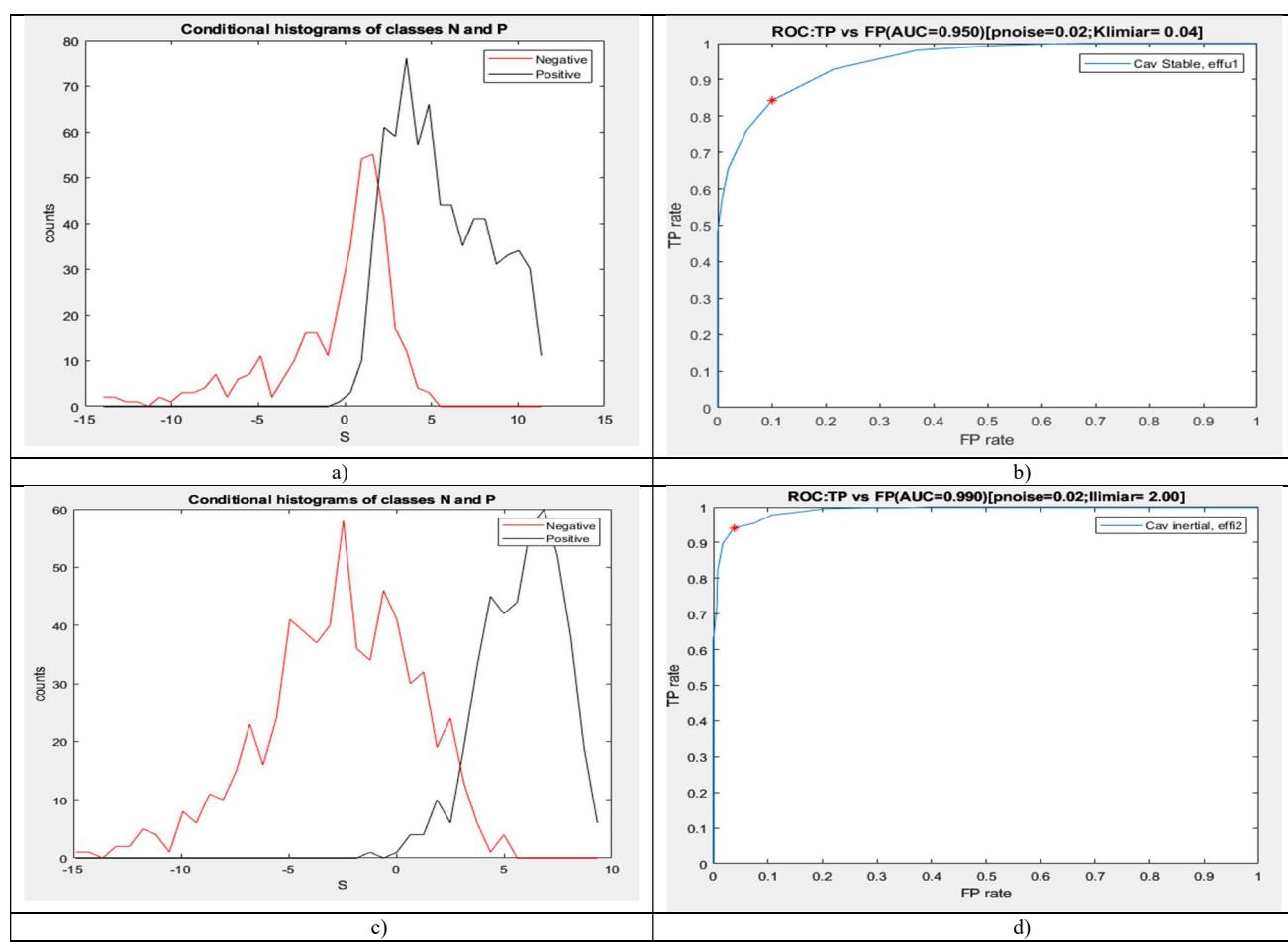


Figure 5.3. Detetor de cavitação estável para banda larga: a) histograma condicional; b) ROC. Detetor de cavitação inercial (f_{i2}) para banda larga: c) histograma condicional; d) ROC. (obtido por `xls_read_and_ROC.m`)

A Table 5.4 resume os valores de AUC obtidos e nota-se que os detetores baseados no critério 4.03.18 para banda larga tiveram desempenhos melhores do que os da banda estreita (Table 4.6) como esperado, com destaque para a deteção da cavitação inercial tanto pela banda fi2 quanto pela banda fi3.

Table 5.4. Valores de AUC para os detetores com critério 4.03.18

Cav estável	Cav inercial	
	fi2	fi3
0.9500	0.9898	0.9740

Os respectivos mapas de deteção utilizando os limiares com menores falsos-positivos e falsos-negativos ($S_{min_FP_FN}$) de cada detetor são mostrados na Figure 5.4.

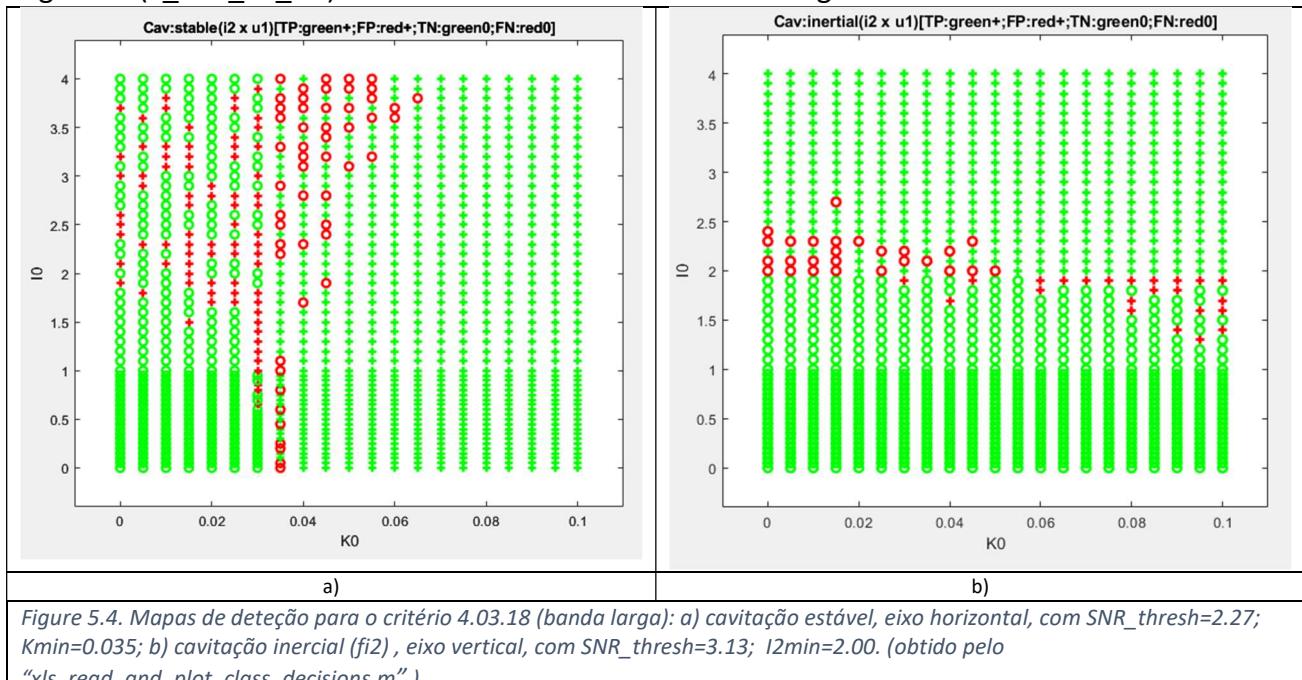


Figure 5.4. Mapas de deteção para o critério 4.03.18 (banda larga): a) cavitação estável, eixo horizontal, com $SNR_thresh=2.27$; $Kmin=0.035$; b) cavitação inercial (fi2), eixo vertical, com $SNR_thresh=3.13$; $I2min=2.00$. (obtido pelo "xls_read_and_plot_class_decisions.m")

A Figure 5.4.a mostra que à medida que se aumenta o valor de I0 ocorrem mais FNs e FPs no detector de cavitação estável, indicando o difícil efeito do inercial no detector de cavitação estável, mesmo em banda larga. A sensibilidade e especificidade do detetor de cavitação estável ($AUC=0.9500$), para o $SNR_thresh=2.27$, foi de 0.93 e 0.78, respectivamente.

Na Figure 5.4.b, nota-se o efeito da estável no detetor de cavitação inercial usando a faixa fi2. O detector tem um desempenho muito bom, porém detecta-se eventos do tipo inercial somente para I0 maior do que $I2min=2.00$. A sensibilidade e especificidade do detetor de cavitação inercial ($AUC=0.9898$), para o $SNR_thresh=3.13$, foi de 0.94 e 0.96, respectivamente.

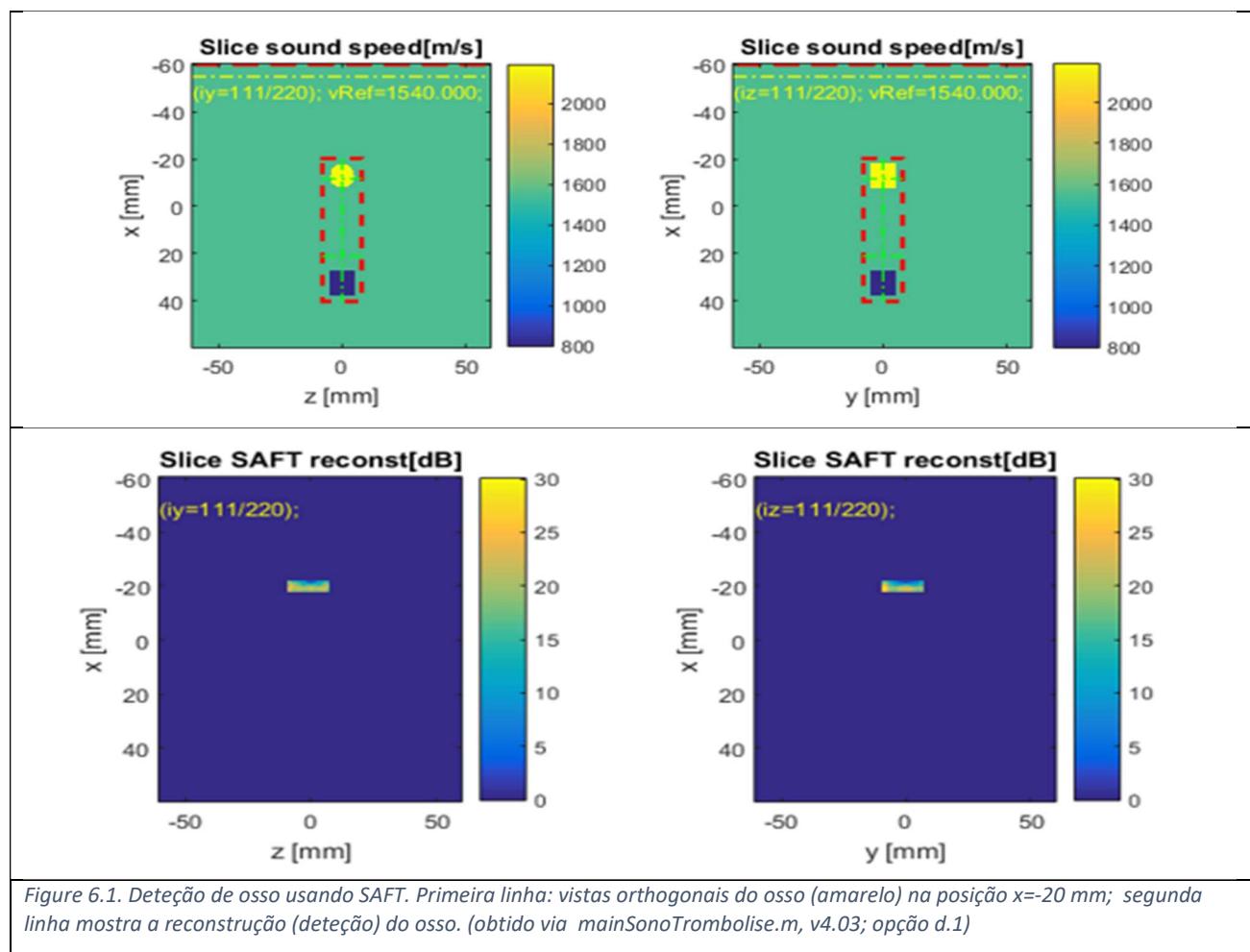
Ressalte-se que no caso de receptores de banda larga, a faixa fi3 é uma opção para a deteção de cavitação inercial. O AUC obtido foi de 0.9740, onde a sensibilidade e especificidade do detetor de cavitação inercial, para o $SNR_thresh=2.79$, foi de 0.92 e 0.91, respectivamente.

Conclui-se que o critério 4.03.18 para banda larga tem desempenho bem melhor do que para banda estreita, como esperado. Com receptores de banda larga tanto a faixa fi2 quanto a faixa fi3 podem ser utilizadas para detectar a cavitação inercial, com AUC superior a 0.97.

6. Pesquisa para driblar ossos

Os ossos (esternos) causam sombras acústicas diminuindo a intensidade nos focos e prejudicando a eficiência da sonotrombólise. Outra razão importante é que os ossos apresentam coeficiente de atenuação muito maior (13.8 dB/MHz/cm) do que tecidos moles, podendo potencialmente causar efeito térmico deletério dependendo da intensidade acústica.

Implementamos o algoritmo SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) para reconstruir as paredes dos ossos, uma vez que eles apresentam alta impedância acústica. O SAFT é amplamente usado nos equipamentos convencionais de ultrassonografia modo-B, i.e., baseados no pulso-eco. A Figure 6.1 mostra os resultados obtidos: o osso (amarelo) está situado na posição $x=20$ mm mostrados na primeira linha da figura; a segunda linha mostra a reconstrução (deteção) do osso, que pode então ser usada para reconfigurar os disparos dos transdutores de modo a evitar os ossos. O código (opção d.1) está no repositório de dados (github) deste projeto.



7. Conclusão e discussão

O detector proposto (critério 4.03.18) considera e desconta o efeito dos eventos das faixas vizinhas no eixo da frequência. Outro aspecto importante da proposta é utilizar o conceito de relação sinal/ruído (SNR) nas bandas de frequência de interesse, tornando a abordagem menos sensível ao ruído e às interferências entre eventos.

A partir dos experimentos simulados, conclui-se que a deteção da cavitação estável é viável, mesmo utilizando receptores de banda estreita. A área sobre a curva ROC obtida foi de 0.9416, com sensibilidade e especificidade da ordem de 0.88 e 0.88, respectivamente. Para a deteção da cavitação inercial com receptores de banda estreita, a AUC cai para 0.9080, com sensibilidade e especificidade de 0.77 e 0.84.

O desempenho dos detectores melhoram com a utilização de receptores de banda larga, como esperado. Para a cavitação estável, a AUC aumenta para 0.9500 com sensibilidade e especificidade da ordem de 0.93 e 0.78, respectivamente. Como se sabe, a sensibilidade e especificidade dependem do limiar. A melhoria no desempenho é mais notável para a cavitação inercial, para a qual a AUC aumenta para 0.9898 com sensibilidade e especificidade da ordem de 0.94 e 0.96 para a banda fi2. A banda fi2 é a faixa entre a primeira ultra-harmônica e a segunda harmônica.

Ressalte-se que no caso de receptores de banda larga, a faixa fi3 é uma opção para a deteção de cavitação inercial. A banda fi3 é a faixa entre a segunda harmônica e a segunda ultra-harmônica. Nesse caso, a AUC obtida foi de 0.9740, na qual a sensibilidade e especificidade do detector de cavitação inercial foram de 0.92 e 0.91.

Essa avaliação foi realizada sobre sinais acústicos simulados. Contudo, as simulações são bastante realistas, baseados no toolbox kwave (Treeby, 2010), que suporta meios heterogêneos, não-linearidade e propagação das ondas no meio acústico, incluindo os fenômenos de atenuação, divergência, difração, refração e espalhamento.

No caso específico do ambiente criado nesse projeto, geram-se os focos de eco e cavitações no meio, e estes sinais são propagados no meio até atingir um conjunto de receptores. Os sinais recebidos, já com ruído, são sincronizados para produzir um sinal resultante com melhor relação sinal/ruído. Sobre este sinal resultante é realizada a análise espectral do SNR de cada banda.

Trabalhos futuros devem incluir testes experimentais com tanque acústico e microbolhas para verificar esses resultados. Será necessário ter um equipamento em paralelo (controle) que monitore a ocorrência e tipo de cavitação, o que não é simples. Cavitações iniciais são perceptíveis por equipamentos de ultrassonografia modo-B, pois quando ocorre muita cavitação inercial surge um elevado contraste momentâneo. Cavitação estável é mais difícil de visualizar, e provavelmente a melhor forma é via análise espectral do sinal captado por um hidrofone.

Foram realizados testes preliminares em tanque acústico, porém devido a atrasos na confecção dos transdutores matriciais e à complexidade dos experimentos não foi possível até o momento obter conclusões minimamente relatáveis. O nosso laboratório ficou com acesso parcial durante os 2 anos da pandemia.

8. Referências

- APFEL RE, HOLLAND CK. GAUGING THE LIKELIHOOD OF CAVITATION FROM SHORT-PULSE, LOW-DUTY CYCLE DIAGNOSTIC ULTRASOUND. *ULTRASOUND MED BIOL.* 1991;17(2):179-85. DOI: 10.1016/0301-5629(91)90125-G. PMID: 2053214.
- CHEN X, WANG J, PACELLA JJ, VILLANUEVA FS. DYNAMIC BEHAVIOR OF MICROBUBBLES DURING LONG ULTRASOUND TONE-BURST EXCITATION: MECHANISTIC INSIGHTS INTO ULTRASOUND-MICROBUBBLE MEDIATED THERAPEUTICS USING HIGH-SPEED IMAGING AND CAVITATION DETECTION. *ULTRASOUND MED BIOL.* 2016 FEB;42(2):528-538. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.2015.09.017. EPUB 2015 Nov 18. PMID: 26603628; PMCID: PMC4698009.
- CHITNIS (2019). P. V. CHITNIS, C. H. FARNY AND R. A. ROY, "SVD-BASED SEPARATION OF STABLE AND INERTIAL CAVITATION SIGNALS APPLIED TO PASSIVE CAVITATION MAPPING DURING HIFU," IN IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. 66, NO. 5, PP. 857-866, MAY 2019, DOI: 10.1109/TUFFC.2019.2898917.
- COVIELLO C, KOZICK R, CHOI J, GÖNGY M, JENSEN C, SMITH PP, COUSSIOS CC. PASSIVE ACOUSTIC MAPPING UTILIZING OPTIMAL BEAMFORMING IN ULTRASOUND THERAPY MONITORING. *J ACoust Soc Am.* 2015 MAY;137(5):2573-85. DOI: 10.1121/1.4916694. PMID: 25994690.
- EVERBACH EC, MAKIN IR, AZADNIV M, MELTZER RS. CORRELATION OF ULTRASOUND-INDUCED HEMOLYSIS WITH CAVITATION DETECTOR OUTPUT IN VITRO. *ULTRASOUND MED BIOL.* 1997;23(4):619-24. DOI: 10.1016/s0301-5629(97)00039-2. PMID: 9232771.
- GRUBER, M. J., BADER, K. B., & HOLLAND, C. K. (2014). CAVITATION THRESHOLDS OF CONTRAST AGENTS IN AN IN VITRO HUMAN CLOT MODEL EXPOSED TO 120-KHZ ULTRASOUND. *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA*, 135(2), 646–653. [HTTPS://DOI.ORG/10.1121/1.4843175](https://doi.org/10.1121/1.4843175)
- HAWORTH KJ, BADER KB, RICH KT, HOLLAND CK, MAST TD. QUANTITATIVE FREQUENCY-DOMAIN PASSIVE CAVITATION IMAGING. *IEEE TRANS ULTRASON FERROELECTR FREQ CONTROL.* 2017 JAN;64(1):177-191. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2620492. EPUB 2016 Oct 25. PMID: 27992331; PMCID: PMC5344809. [HTTPS://IEEEXPLORE.IEEE.ORG/DOCUMENT/7676243?GATHSTATICON=TRUE](https://ieeexplore.ieee.org/document/7676243?gathstaticon=true)
- HAWORTH KJ, MAST TD, RADHAKRISHNAN K, BURGESS MT, KOPECHEK JA, HUANG SL, MCPHERSON DD, HOLLAND CK. PASSIVE IMAGING WITH PULSED ULTRASOUND INSONATIONS. *J ACoust Soc Am.* 2012 JUL;132(1):544-53. DOI: 10.1121/1.4728230. PMID: 22779500; PMCID: PMC3407164.
- (KIM, 2019) PILSU KIM, SUA BAE, JAE HEE SONG, AND TAI-KYONG SONG. COMPARISON STUDY OF PASSIVE ACOUSTIC MAPPING AND HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY FOR MONITORING IN SITU CAVITATION BUBBLES; *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA* 145, EL604 (2019); DOI: 10.1121/1.5113961
- KLIBANOV, A. L. (2002). "ULTRASOUND CONTRAST AGENTS: DEVELOPMENT OF THE FIELD AND CURRENT STATUS," *TOP. CURR. CHEM.* 222, 73–106.
- LYKA ERASMIA, CHRISTIAN COVIELLO, RICHARD KOZICK, AND CONSTANTIN-C. COUSSIOS. SUM-OF-HARMONICS METHOD FOR IMPROVED NARROWBAND AND BROADBAND SIGNAL QUANTIFICATION DURING PASSIVE MONITORING OF ULTRASOUND THERAPIES; *THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA* 140, 741 (2016); DOI: 10.1121/1.4958991
- PAPADOPOULOS N, DAMIANOU C. MICROBUBBLE-BASED SONOTHROMBOLYSIS USING A PLANAR RECTANGULAR ULTRASONIC TRANSDUCER. *J STROKE CEREBROVASC DIS.* 2017 JUN;26(6):1287-1296. DOI: 10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2017.01.023. EPUB 2017 FEB 22. PMID: 28236599.
- B. E. TREEBY AND B. T. COX, "K-WAVE: MATLAB TOOLBOX FOR THE SIMULATION AND RECONSTRUCTION OF PHOTOACOUSTIC WAVE-FIELDS," *J. BIOMED. OPT.*, VOL. 15, NO. 2, P. 021314, 2010.
- B. E. TREEBY, J. JAROS, A. P. RENDELL, AND B. T. COX, "MODELING NONLINEAR ULTRASOUND PROPAGATION IN HETEROGENEOUS MEDIA WITH POWER LAW ABSORPTION USING A K-SPACE PSEUDOSPECTRAL METHOD," *J. ACoust. Soc. Am.*, VOL. 131, NO. 6, PP. 4324-4336, 2012.

9. Descrição e avaliação do apoio institucional recebido no período

No período, o apoio institucional foi adequado. Utilizamos a infraestrutura do laboratório (LEB) para as simulações. Os estudantes, tanto de graduação como de pós-graduação, têm-se empenhado no projeto. Utilizamos também recursos departamentais e da universidade, tais como material de consumo

10. Plano de atividades realizadas no período

O projeto foi desenvolvido de acordo com o cronograma proposto, exceto nos itens 8 e 9. Não foi possível realizar o item 8 até o momento devido a atrasos na confecção dos transdutores matriciais, pois o nosso laboratório ficou praticamente fechado durante o pico da pandemia. O item 9 está em andamento como parte da tese de doutorado direto de Roberto Ceccato, que versa sobre a tomografia a partir de ecos.

Descrição das atividades (em trimestres)	Ano anterior				5	6	7	8
1. Modelo teórico detalhado da geração dos sinais de cavitação	✓							
2. Desenvolvimento de ambiente de simulação para meio não-homogêneo com ecos e fontes de cavitação	✓	✓	✓					
3. Filtragem visando ressaltar os sinais de cavitação		✓	✓					
4. Sincronização dos sinais e estimativa do sinal-fonte		✓	✓	✓				
5. Análise espectral para a detecção de tipos de cavitação. Abordagens alternativas para a detecção.				✓	✓	✓		
6. Mapas de atividade					✓	✓		
7. Avaliação por simulação					✓	✓	✓	
8. Avaliação do detector de cavitação em cuba acústica						-	-	
9. Pesquisa para driblar ossos						✓	✓	✓
10. Relatórios e publicações				✓				✓

✓: realizado no período

11. Descrição sucinta e justificada da aplicação dos recursos

Utilização dos Recursos da Reserva Técnica no período

No período corrente, os recursos da Reserva Técnica não foram utilizados.

Utilização dos Recursos de Benefícios Complementares no período corrente

Não houve utilização dos Benefícios Complementares no período.

12. Lista de produção no ano 2 relacionada ao projeto

Trabalhos em revistas

1. (submetido nov/2022) A. V. Pigatto, Member, J. L. Mueller, N. B. Rosa, and Sergio Furuie. A Low-Frequency Ultrasound Tomography System for Lung Imaging. IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING

Trabalhos em conferências

1. Wilton Ruas Silva and Sergio S. Furuie. Ultrasound coupled radial vibration mode: influence on cardiac sonothrombolysis. CLAIB 2022 & CBEB 2022 (IX Latin American Congress on Biomedical Engineering & XXVIII Brazilian Congress on Biomedical Engineering)
2. Guenkawa, Patricia, Sérgio Furuie, and Glauco Caurin. “Classification of Cardiac Arrhythmias by Images and Neural Network Model, CLAIB 2022 & CBEB 2022 (IX Latin American Congress on Biomedical Engineering & XXVIII Brazilian Congress on Biomedical Engineering)
3. (aceito) Sergio S Furuie, Wilton R Silva, Vitoria S Souza, Patricia A S Guenkawa. Investigation of Cavitation Detector for Sonothrombolysis. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering-CCECE 2023. 5pgs
4. (aceito) Patricia A S Guenkawa, S S Furuie. An analysis of Cavitation in Sonothrombolysis through Convolutional Neural Networks. Computing in Cardiology 2023, Atlanta, 1-4/10/2023
5. (aceito) Vitoria S Souza, S S Furuie. Spectral Profiles of Sonothrombolysis Sounds Received by a Transducer. 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium

Orientações de Pós-graduação relacionados ao projeto

1. Doutorandos (em andamento)
 - a. Vitor Gabriel Barra Souza. Sonothrombolysis: An Investigation into its Mechanisms and Biological Effects. Bolsa FAPESP Doutorado Direto (vinculado a projeto temático, a partir de 01/09/2020)
 - b. Wilton Ruas da Silva. Estudo para o desenvolvimento de um equipamento específico para sonotrombólise. Bolsa FAPESP Doutorado Direto (vinculado a projeto temático, a partir de 01/03/2021)
 - c. Roberto Costa Ceccato. Reconstrução tomográfica utilizando ultrassom a partir do hardware de sonotrombólise. Iniciado em março/2022. Bolsa DD, FAPESP 2021/13997-0 (01/04/2022 a 31/07/2025). Cota projeto temático FAPESP (Coordenador: Wilson Mathias Jr)
2. Mestrados (em andamento)
 - a. Patricia Akemi Sekini Guenkawa, “Detecção e localização de cavitação via inteligência artificial”, bolsa CNPq(institucional) de 1/3/21-28/2/23.

13. Anexos: cópias de trabalhos

(*OBS.: como a inclusão destes artigos ultrapassa o limite de 5MB permitidos pelo SAGE, inclui o PDF com alguns trabalhos relacionados a este projeto em “outros documentos” do SAGE*)

14. Apêndices

Plano de gestão de dados

Utilizamos o repositório de dados oficial da USP em: <https://repositorio.uspdigital.usp.br/> para as publicações referentes a este projeto. A intenção inicial era utilizar este local também para os códigos, porém o repositório da USP é somente para publicações, não havendo abertura para arquivos não publicados. Dessa forma, utilizamos o github (modo público) para os códigos, resultados e documentação detalhada (relatórios): <https://github.com/ssfurui/cavitação-proj-FAPESP-2021-04814-9/tree/main>.

Visando facilidades na compreensão dos códigos, usamos matlab e classes de objetos (orientados a objetos) para encapsulamento de problemas complexos. Em cada classe importante, há exemplos de utilização.

Visando facilidades na utilização dos programas, empregamos o conceito de tarefas que podem ser chamadas por um script simples, conforme documentado nas próximas seções. Em cada execução, gera-se um arquivo texto com os resultados obtidos.

Informamos também que todos os códigos e relatórios foram disponibilizados para os alunos e colaboradores do projeto.

Projeto e dados

O projeto proposto envolve a geração de muitos dados advindos de simulações, pois pretende-se inicialmente avaliar a abordagem por simulação. Serão simulações de sinais de cavitação e de propagação de ecos em meios heterogêneos. Para se avaliar a detecção, será necessário variar a amplitude relativa da cavitação, bem como o nível de ruído. Cada fase do desenvolvimento também implicará em vários testes para verificar a acurácia da implementação computacional.

Na fase experimental, para cada situação (distância do transmissor, tipo de microbolhas, fluxo das microbolhas, posição do receptor, tipo de transdutor, ...) serão medidas as pressões de excitação e as pressões incidentes nos transdutores em função do tempo. Estas tabelas serão arquivadas junto com os metadados.

Os resultados, relatórios, códigos e dados estão no github, no link acima.

Visão geral do programa mainSonoTrombolise.m

O programa está estruturado de modo a facilitar o seu uso por meio de diversas chamadas que podem ser realizadas em modo *batch*, especificando os valores dos parâmetros que definem o comportamento da simulação. O programa também pode ser rodado em modo interativo escolhendo a tarefa desejada, porém assumindo os valores default dos parâmetros, os quais podem ser modificados via alteração do código.

Um exemplo do modo batch com 2 chamadas ao programa:

```
% -----
argsin={'cav_simul_id','singlePointCombinedTypes',...
    'EchoAmpfactor',1,'StableAmpfactor',0.30,'InertAmpfactor',20.00,... %cavitation type
    'NoiseLevel_dynRangeFactor',0.05,'FL',0.75,'FR',0.75,... %amplitudes
    'opcao','i.2.0','result_suffix','inertialXstable_crit'};
mainSonoTrombolise(argsin);
% -----
%
argsin={'cav_simul_id','singlePointCombinedTypes',...
    'EchoAmpfactor',1,'StableAmpfactor',0.30,'InertAmpfactor',10.00,... %cavitation type
    'NoiseLevel_dynRangeFactor',0.05,'FL',0.75,'FR',0.75,... %amplitudes
    'opcao','i.2.0','result_suffix','inertialXstable_crit'};
mainSonoTrombolise(argsin);
```

E de modo interativo:

```
>> mainSonoTrombolise
Project SonoTrombolise - EPUSP/InCor, Version 3.12 (15/04/2022)
You have chosen as configuration option: byTask
a)Quick TEST(debugging) for rarefaction pressure and heat,2 foci(ok,tested;0m:56s):
[realistic grid; homogeneous medium; TRs uniformlyDistributed; foci:AtCenter_axial2; Sensorlavg_region: ROI]
b)focus analysis at ROI center (central axial line contains a TR center)(ok,tested;0m:29s):
[realistic grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensorlavg_region: ROI]
b.1)focus analysis at ROI center (central axial line does not necessarily contain a TR center)(ok,tested;0m:29s):
[realistic grid; homogeneous medium; TRs aroundCenter; foci:AtCenter_axial; Sensorlavg_region: ROI]
b.2)same as b.1, but for non-homogeneous medium(ok,tested;6m:40s):
[realistic grid; boneLungPieces medium; TRs aroundCenter; foci:AtCenter_axial; Sensorlavg_region: centralCuboide]
c)Temperature and ISPTA analysis in central cuboid region(ok,tested;8h:19m:00s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:specific3 ; Sensorlavg_region: centralCuboide]
c.1)Quick TEST, temperature and ISPTA analysis in central cuboid region(ok,tested;19m:52s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial3; Sensorlavg_region: centralCuboide]
d)Quick TEST for BONE detection,3x3 TRs,2 foci and quit(ok,tested;19m25s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial2; Sensorlavg_region: centralCuboide]
d.1)TEST for BONE detection,All TRs,2 foci and quit (ok,tested;2h25m:00s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs uniformlyDistributed; foci:AtCenter_axial2; Sensorlavg_region: centralCuboide]
g)Typical echo spectrum for 1 TR. Narrow-band TR simulation via filter; Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor). Focus at center,1TX,1RX and quit(ok,tested;08m07s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensorlavg_region: centralCuboide]
h)Simulation of cavitation sources. Focus at center. Group of TR as receivers.(17m:00s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i)Analysis of cavitation(with cav.simulation). Group of TR as receivers.And quit():
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.0.1)Test of ECHO sources. Echo signal and spectrum. Quit.(< 1min):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.0.2)Test of STABLE cav sources. Cav signal and spectrum. Quit.(< 1min):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.0.3)Test of INERTIAL cav sources. Cav signal and spectrum. Quit.(< 1min):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.0.4)Test of combined sources. Source signal(amplitudes set by:E0,S0,I0) and spectrum. Quit.(< 1min):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.1)Test of RECEPTION(source set by TASK.cav_simul_id).No TX source signal.No TR emulation.Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor).Group of TR as receivers. Quit(04m:00s):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.2)Test of RX EMULATION(source set by TASK.cav_simul_id).No TX source signal.Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor).Group of TR as receivers.And quit(04m:00s):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.2.0)Test of CAVITATION DETECTION;D&S in FREQ domain;(source set by TASK.cav_simul_id).No TX source signal.
Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor).Group of TR as receivers.And quit(tested ok,< 3min)
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.2.1)Test of CAVITATION DETECTION;D&S in TIME domain;(source set by TASK.cav_simul_id).No TX source signal.
Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor).Group of TR as receivers.And quit(xx)
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.3)Test: TX(echoes) and cavitation sources;window; TR emulation;Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor);delay-and-sum;spectrum.Group of TR as receivers.And quit(09m:00s):
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
i.4)Test of cavitation sources and signals.No TX source signal.No TR emulation.Noise(set by TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor).Group of TR as receivers. Save signals, quit(4m:00s):
[high res. grid; homogeneous medium; TRs centeredTR; foci:AtCenter_axial; Sensor_region: centralCuboide]
p)rarefaction pressure and temperature analysis, homogeneous (ok,tested;07h:33m:00s)
[realistic grid; homogeneous medium; TRs uniformlyDistributed; foci:specific2; Sensorlavg_region: ROI]
q)rarefaction pressure analysis,high res. grid, homogeneous,3 focus x-plane (ok,tested;02d01h48m00s)
[high res. grid; homogeneous medium; TRs uniformlyDistributed; foci:specific3; Sensorlavg_region: ROI]
q.1)rarefaction pressure analysis, boneLungPieces,3 focus x-plane(ok,tested;08h:11m:00s)
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs uniformlyDistributed; foci:specific3; Sensorlavg_region: centralCuboide]
q.2)rarefaction pressure analysis with BONE detection,3 focus x-plane(ok,tested;6h:10m:00s)
[high res. grid; boneLungPieces medium; TRs uniformlyDistributed; foci:specific3; Sensorlavg_region: centralCuboide]
Obs.:--Measurements such as p,p_rms,l_avg: require numMask.Nt values x (single or double)x(3 if l*avg), where numMask=number of nonzeros in sensor.mask
-For quantities such as p_min_all, kwave returns values for all Nx,Ny,Nz voxels, regardless of sensor.mask
-If a task requires a transducer in the central axial region (e.g.:focus or intensity in central region), we enforce odd number of transducers in each axis
-If a task uses high contrast medium, we have to use high resolution grid
-pre-defined settings so far (may be overridden by your choice):
  TASK.cav_simul_id=singlePointCombinedTypes;
  TASK.NoiseLevel_dynRangeFactor= 0.050 (factor for noise std)
```

-cited elapsed time is using LEB-SF2018 (Dell XPS8930,i7-8700CPU@3.20GHz,64GB,win10,C++,GPU Nvidia GTX1060,6GB)
 Configurations(25) for a task:
 Choose==>

O diagrama em blocos do sistema é a descrita na Figure 1.1 e aqui detalhada do ponto de vista de entrada de parâmetros (Figure 14.1), em especial para os blocos {D, E, F} para utilizar o programa.

O programa assumirá valores *default*, a menos que sejam passados via argumento na chamada do programa, por exemplo:

`mainSonoTrombolise('NoiseLevel_dynRangeFactor',0.05,'opcao','i.2.0');` neste caso estamos especificando o nível de ruído de 0.05 por meio da palavra-chave 'NoiseLevel_dynRangeFactor', e escolhendo a opção de tarefa 'i.2.0' por meio da palavra-chave 'opcao'. Os argumentos são sempre em dupla, especificando a palavra-chave e o seu valor. Caso não haja nenhum argumento, o programa rodará no modo interativo.

As palavras-chave estão definidas na function `getBatchInputPairValues.m`.

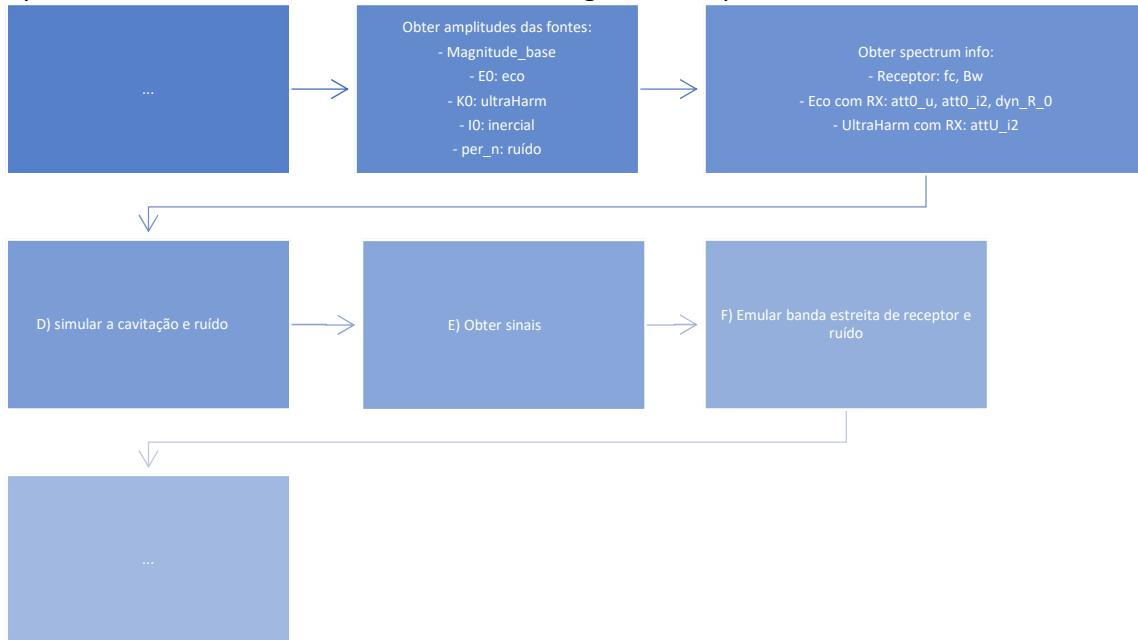


Figure 14.1 Visão global dos parâmetros de entrada para o programa.

Requisitos/Instruções para rodar o programa

INSTRUCTIONS to run this program (`mainSonoTrombolise.m`):

1. kwave should be installed, and kwave should be accessible by matlab (see Home=>Set Path)
2. set your computing environment (which directory to use for saving results).
 Look for the word 'USER_is'; modify it; Create/modify the codes in 'switch(USER_is)' to set mainly some variables that depends on your computer such as DIR_PAIS_DADOS. Otherwise, it will use defaults.
3. There are several parameters and constants that were pre-defined, such as 'SOURCE_MAGNITUDE','HEART_Xmin', ...
4. When you run, you'll see several pre-created tasks (look for 'getSonoTh_config_task')
5. The results (log report) are stored in the file 'results_temp.txt'. The program outputs lots of informations and figures that you can ignore. I just kept them because they are useful for debugging and reassurance.
 -signals and calculated coherent signal are saved as .mat file if TASK.saveCoherentTemporalSignals=true;
 (Obs.: I restricted to first focus because of amount of data. See line: if(TASK.SaveCoherentTemporalSignal==true ..)
 -computed parameters for cavitation analysis are stored as .xlsx file. See line: xlsAppend_SF(xlsFileName,cell_1xN,header)
6. You can run this as a program (just type `mainSonoTrombolise`), or function/batch with arguments (pairs, see `getBatchInputPairValues.m`)