

Algoritmo em GPGPU para Acelerar a Determinação do Campo Acústico Produzido por um Transdutor Ultrassônico Circular com Excitação Contínua

Alberto Lemos Duran ^{*,1} André K. Sato ^{**2}
Agesinaldo M. Silva Jr ^{*,3} Ediguer E. Franco ^{***4}
Flávio Buiochi ^{*,5} Thiago C. Martins ^{**6}
Júlio C. Adamowski ^{*,7} Marcos S. G. Tsuzuki ^{**8}

** Laboratory of Sensors and Actuators*

*** Laboratory of Computational Geometry*

*Mechatronics and Mechanical Systems Engineering Department,
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil*

**** Engineering Faculty, Universidad Autónoma de Occidente
Cali, Colombia*

Abstract: This work presents a GPU algorithm to calculate the acoustic field generated by a circular ultrasonic transducer radiating in water a continuous wave. The acoustic pressure in a space point in front of the transducer is calculated by Rayleigh integral, which uses the Huygens principle to compose the field as the sum of contributions from an infinite number of point sources. Because the pressure at each spatial point can be calculated independently, the solution algorithm can run in parallel, taking advantage of the GPU cores. Some experiments were performed in a frequency range from 0.25 to 5.0 MHz. The radiating surface was discretized in order to have a fixed number of elemental areas per wavelength. Results showed the validity of the acoustic fields simulated. In addition, a performance analysis showed that the GPU was 50 times faster than CPU for the most demanding problems.

Resumo: Este trabalho apresenta um algoritmo implementado em GPU, para calcular o campo acústico produzido por um transdutor ultrassônico com excitação contínua, emitindo em água. A pressão acústica em um ponto do espaço, na frente do transdutor, é calculada mediante a integral de Rayleigh, a qual utiliza o princípio de Huygens para considerar o campo de pressão como a soma da contribuição de um número infinito de fontes pontuais. Dado que a pressão em cada ponto do espaço pode ser calculada de forma independente, o algoritmo pode ser executado em paralelo, aproveitando a vantagem dos núcleos da GPU. Foi analisado o desempenho do algoritmo proposto realizando alguns testes na faixa de frequência de 0,25 a 5,0 MHz. A superfície de emissão foi discretizada com a finalidade de obter um determinado número de elementos finitos de área. Foi possível validar os campos acústicos simulados usando o valor teórico da pressão ao longo do eixo de simetria do transdutor. Adicionalmente, a análise de desempenho mostrou que a GPU foi 50 vezes mais rápida que a CPU, para os problemas mais demandantes.

Keywords: Ultrasound; acoustic field; GPU; Rayleigh integral; GFLOPS.

Palavras-chaves: Ultrassom; campo acústico; GPU; integral de Rayleigh; GFLOPS.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação do ultrassom na indústria tem aumentado rapidamente (Adamowski et al., 2013). Isto devido aos rápidos avanços nos transdutores, na aquisição de dados, no processamento dos sinais, entre outros. A determinação do campo acústico é uma característica importante no desenvolvimento de aplicações para ultrassom, pois proporciona informações sobre como as ondas acústicas são propagadas e como a energia é distribuída nos diferentes meios (Treeby and Cox, 2010).

¹ e-mail: duran@usp.br.

² e-mail: andre.kubagawa@gmail.com.

³ e-mail: agesinaldo.jr@gmail.com.

⁴ e-mail: eefranco@uao.edu.co.

⁵ e-mail: fbuiochi@usp.br.

⁶ e-mail: thiago@usp.br.

⁷ e-mail: jcadamow@usp.br.

⁸ e-mail: mtsuzuki@usp.br.

O campo acústico pode ser determinado resolvendo a integral de Rayleigh, que considera a interação entre uma fonte de emissão plana e o meio de propagação. Neste problema será considerado um transdutor excitado harmonicamente, ou uma forma diferente de excitação (análise transitória).

Embora na maioria dos estudos consideram-se deslocamentos uniformes na superfície de emissão, isto não ocorre em situações reais, e devem ser introduzidas funções que descrevam os deslocamentos (He and Hay, 1993). Existe solução analítica para o campo de pressão axial produzido por um transdutor circular excitado harmonicamente (Kinsler et al., 1999), a integral de King para determinar a pressão produzida por um transdutor circular excitado harmonicamente, (Greenspan, 1979), soluções numéricas para o campo de pressão produzido por transdutores circulares excitados por funções genéricas (resposta impulsiva) (Weight, 1984; Franco et al., 2011; San et al., 2006) e um método para aproximar a resposta impulsiva espacial produzida por um emissor plano arbitrário (Piwakowski and Delannoy, 1989). Visto que a maioria dos transdutores são circulares, a maioria das simulações utilizam geometrias simples; não obstante, existem aplicações específicas em que é necessário usar geometrias mais complexas (por exemplo em vórtices acústicos), e a integral de Rayleigh suporta estes casos mais complexos.

A simulação do campo acústico é um trabalho bastante exigente. Dependendo do tamanho do domínio de análise, da frequência de operação do transdutor e das suposições físicas envolvidas, a carga computacional e a complexidade de problema pode incrementar e, conseqüentemente, a simulação do campo acústico pode demandar mais tempo.

O poder computacional das GPUs tem aumentado drasticamente na última década devido ao alto paralelismo no processamento e à elevada largura de banda na memória, desenvolvida para atender à demanda por gráficos 3D em tempo real e de alta definição (Nvidia, 2018). Esse poder computacional tem sido usado para programação de uso geral em muitas áreas da engenharia e da ciência. Na literatura, encontram-se trabalhos recentes relacionados com o uso de GPUs na área da astronomia (Wang et al., 2015), dinâmica dos fluídos (Franco et al., 2015; Tsiakas et al., 2019), big data (Johnson et al., 2019), agricultura de precisão (Patrício and Rieder, 2018), imagens médicas (Lebedev et al., 2018), entre outros. Especificamente, na área de simulações acústicas, alguns autores utilizaram GPUs para acelerar a solução da equação de onda (Mehra et al., 2012; Diaz et al., 2018; Wang et al., 2018).

Neste trabalho é proposta uma solução baseada na utilização de GPU para acelerar as simulações de campos acústicos e melhorar o desempenho das implementações. A abordagem proposta é diferente, pois é considerado um transdutor circular excitado harmonicamente.

O texto é estruturado da seguinte forma: na Seção 2 descreve-se o problema, e a Seção 3 contém a solução proposta para ser executada em paralelo. Na Seção 4, os resultados experimentais são reportados e discutidos. Finalmente, são apresentadas as conclusões na Seção 5.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Neste trabalho, é determinado o campo acústico através do método da integral de Rayleigh (Kirkup, 1994). Este utiliza o princípio de Huygens para considerar o campo de pressão como a soma da contribuição de um número infinito de fontes pontuais. Desta forma, para um ponto Q , no meio de propagação, a pressão é dada por

$$P_Q(r_Q, t) = \frac{j\omega\rho}{2\pi} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} \cdot \nu_n(x_s, y_s, t) dS \quad (1)$$

sendo:

- t : o tempo instantâneo;
- ω : a frequência angular do transdutor;
- ρ : a densidade do meio de propagação;
- r : a distância entre Q e o diferencial de área (dS);
- r_Q : o vetor posição do ponto Q , considerando a origem no centro do círculo;
- $\nu_n(x_s, y_s, t)$: a componente normal da velocidade superficial do transdutor no ponto (x_s, y_s) e no instante t ;
- k : o número de onda.

Para uma excitação harmônica, a componente normal da velocidade superficial do transdutor é da forma $\nu_n(x_s, y_s, t) = \nu_n(x_s, y_s)e^{j\omega t}$. Logo, a resposta para uma amplitude uniforme é

$$P_Q(r_Q) = \frac{j\omega\rho U_0}{2\pi} \int_S \frac{e^{-jkr}}{r} dS, \quad (2)$$

sendo U_0 a componente normal, e uniforme, da velocidade superficial do transdutor.

Dividindo o domínio da superfície do transdutor em pequenos quadrados, que são aproximadamente fontes pontuais, como é mostrado na Fig. 1, a pressão está dada por

$$\tilde{P}_Q(r_Q) = \frac{j\omega\rho U_0 dA}{2\pi} \left\{ \sum_{n=1}^N \left[\frac{\cos(kr_n)}{r_n} \right] - j \sum_{n=1}^N \left[\frac{\sin(kr_n)}{r_n} \right] \right\} \quad (3)$$

sendo r_n a distância entre a área diferencial e o ponto Q . Finalmente, é introduzido o parâmetro pps , que indica o número de divisões por comprimento de onda λ , sendo possível controlar a discretização da forma $dx = dy = \frac{\lambda}{pps}$. Logo, a pressão absoluta do ponto Q é

$$\left\| \tilde{P}_Q(r_Q) \right\| = \frac{\rho U_0 \lambda^2 f}{pps^2} \left\| \sum_{n=1}^N \left[\frac{\cos(kr_n)}{r_n} \right] - j \sum_{n=1}^N \left[\frac{\sin(kr_n)}{r_n} \right] \right\|. \quad (4)$$

3. SOLUÇÃO PROPOSTA POR GPU

A técnica de integração numérica discretiza o domínio, o que inclui o transdutor e o volume de interesse na sua vizinhança. Usando o princípio de Huygens, a pressão absoluta para cada ponto está dada por (4). Para aproveitar

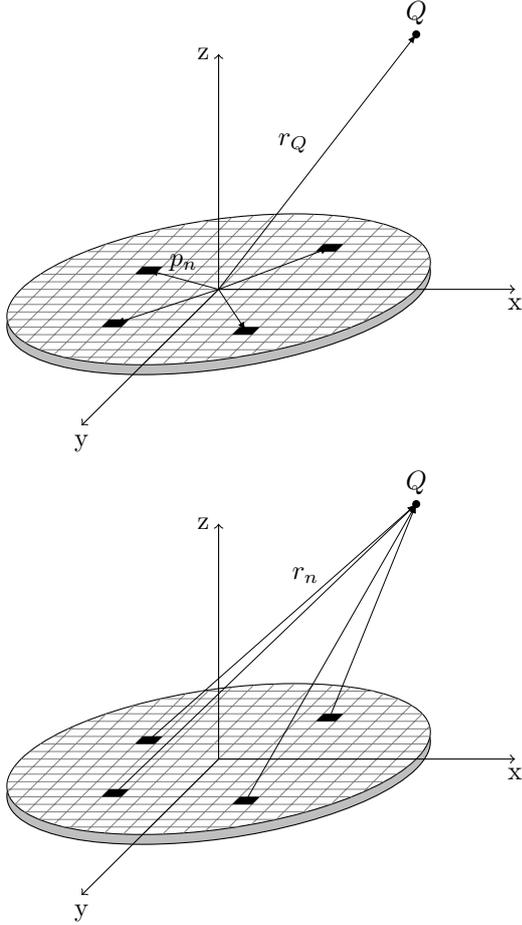


Figura 1. Superfície do transdutor discretizada em N elementos pelo método da integral de Rayleigh. O vetor r_Q determina a posição do ponto Q e o vetor p_n representa a posição do diferencial de área quadrado, considerando a origem no centro do círculo, para ambos. O vetor r_n representa o trajeto para a onda acústica, começando no diferencial de área quadrada dA e terminando no ponto Q .

ainda mais a paralelização, a determinação da pressão pode ser dividida em dois passos. O primeiro consiste na determinação de duas somas, que provém das partes real e imaginária da pressão. Posteriormente, a pressão absoluta é obtida calculando a norma do número complexo resultante, multiplicada por um escalar.

Separando o procedimento, as duas somatórias podem ser executadas em paralelo, obtendo por resultado uma maior utilização dos núcleos da GPU. No entanto, ele introduz um ponto de sincronização, que é imposto entre os pares correspondentes de threads.

O Algoritmo 1 detalha o kernel para a determinação da pressão absoluta. O indicador da thread é armazenado na variável tid e é único para cada thread. O número de threads corresponde ao dobro de número de elementos da região de interesse discretizada. O primeiro passo, descrito da linha 2 até a 9, realiza as somas. O vetor $p[n]$ na linha 5 armazena o vetor que inicia no centro do círculo e termina no elemento diferencial quadrado. Logo, finalizada

Algorithm 1 Kernel para a determinação da pressão absoluta

```

1:  $r_x \leftarrow r_{Q,x}[tid/2]; r_y \leftarrow r_{Q,y}[tid/2]; r_z \leftarrow r_{Q,z}[tid/2]$ 
2:  $S[tid] \leftarrow 0$ 
3: for  $n = 1:N$  do
4:    $p_x \leftarrow p_{n,x}[n]; p_y \leftarrow p_{n,y}[n]; p_z \leftarrow p_{n,z}[n]$ 
5:    $r_n \leftarrow \sqrt{(r_x - p_x)^2 + (r_y - p_y)^2 + (r_z - p_z)^2}$ 
6:   if  $tid$  é par then
7:      $S[tid] \leftarrow S[tid] + \frac{\cos(kr_n)}{r_n}$ 
8:   else
9:      $S[tid] \leftarrow S[tid] + \frac{\sin(kr_n)}{r_n}$ 
10: synchronize
11: if  $tid$  é par then
12:   return  $\frac{\rho U_0 \lambda^2 f}{pps^2} \sqrt{S[tid]^2 + S[tid+1]^2}$ 

```

a sincronização, apenas a metade dos threads realizam o último passo, que dá lugar à pressão absoluta.

3.1 Implementação

A pressão absoluta foi calculada em um plano perpendicular à face do transdutor, desde $x = 0$ até $x = 2a$, sendo a o raio do transdutor, e desde $z = 0$ até $z = 1,25 a^2/\lambda$, sendo a^2/λ a distância que separa o campo próximo do campo distante. Pela simetria do problema, o campo de pressão no espaço tridimensional corresponde a revolucionar 360° o plano calculado, ao redor do eixo de simetria. As dimensões do plano e do emissor permitem calcular o número total de elementos, lembrando que $dx = dy = dz = \frac{\lambda}{pps}$.

As implementações foram desenvolvidas usando o compilador Visual Studio 2017 C++. A variante sequencial, simplesmente implementa a equação (4) para cada ponto no domínio. A segunda implementação consiste na solução em paralelo proposta para GPU, a qual usou a CUDA API. Todos os testes foram executados em um computador com processador Intel Core i7 870 - 2,93 GHz, memória RAM de 16 GB e uma GPU GPU GeForce GTX TITAN X.

4. RESULTADOS

Com a finalidade de avaliar a solução baseada em GPU, foi implementado um conjunto de simulações. Estas consideraram um transdutor ultrassônico com superfície de emissão circular com diâmetro de 0,75 polegadas, operando a diferentes frequências na faixa de 0,25 MHz a 5MHz, e emitindo em água. Outros parâmetros considerados foram:

- velocidade do som na água (c): 1500m/s;
- densidade da água (ρ): 1000kg/m³;
- velocidade normal de deslocamento (U_0): 1m/s;
- número de elementos por comprimento de onda (pps): 4.

Fixando o valor do parâmetro pps garante-se um mesmo número de elemento por comprimento de onda. Portanto, para frequências mais altas, tem-se mais elementos e, conseqüentemente, a simulação tem uma carga computacional mais elevada.

4.1 Resultados

A Tabela 1 mostra os tempos de execução das simulações para as versões do algoritmo implementadas na CPU e

na GPU. A coluna GFLOP (10^9 floating point operations) foi obtida através de um procedimento simples de contagem de todas as operações envolvidas, por exemplo, somas, multiplicações, funções trigonométricas, e raízes quadradas. Logo, o desempenho corresponde à razão entre os tempos de execução obtidos de forma sequencial e em paralelo.

Tabela 1. Resultados das simulações implementadas na CPU e na GPU. *Freq.*: frequência em MHz. *N. elms*: número total de elementos, *Desemp.*: desempenho relativo.

Freq.	N. elms	GFLOP	Tempo de ex. (s)		Desemp.
			CPU	GPU	
0.25	257	2.78E-04	0.000	0.001	0.30
0.50	1,740	1.04E-02	0.014	0.006	2.33
0.75	5,390	8.21E-02	0.104	0.013	8.00
1.00	11,963	3.34E-01	0.462	0.024	19.25
2.25	125,917	2.01E+01	24.208	0.585	41.38
3.50	459,317	1.82E+02	219.676	4.273	51.41
5.00	1,318,561	1.08E+03	1,319.840	24.369	54.16

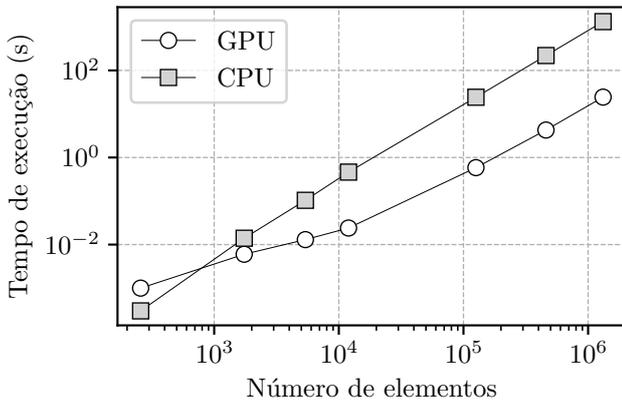


Figura 2. Tempo gasto para as duas variações de determinação do campo acústico.

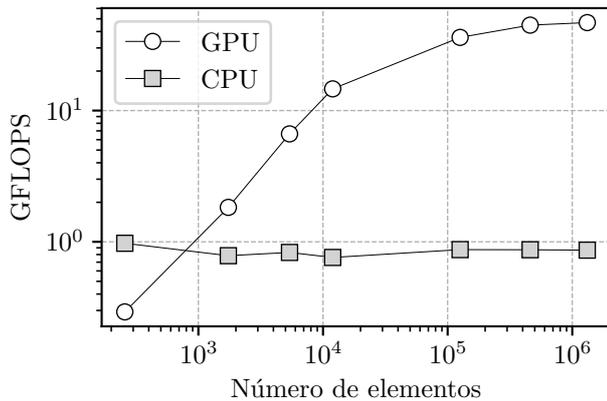


Figura 3. GFLOPS para as duas variações para a determinação do campo acústico.

A Fig. 2 compara os tempos de execução para as duas variantes do algoritmo. Nota-se que a implementação proposta alcança um melhor desempenho para todos os testes com um número de elementos superior a 1740. Além disso,

como as duas curvas crescem de forma exponencial, nota-se que o impacto na aceleração para maiores frequências é substancial. Analisando o número de GFLOP por segundo, mostrado na Fig. 3, é possível determinar que a variante para GPU melhora seu desempenho na medida em que o número de elementos incrementa. Para um número pequeno de elementos (inferior a 1740), a transferência de dados do host para a GPU, e as operações de configuração na GPU podem tomar mais tempo que o processamento realizado na CPU, afetando o desempenho. Por outro lado, o desempenho parece estagnar em torno dos 1,3 milhões de elementos, o que corresponde à frequência de 5 MHz. Isso é consequência do aumento das operações de transferência de dados na GPU, especificamente entre os multiprocessadores e a memória global (ver Tabela 1).

Finalmente, a Fig. 4 mostra a simulação do campo acústico (fila superior) e da pressão axial (fila do meio), e o erro relativo (fila inferior) para as frequências de 1, 0, 2, 25 e 3, 5 MHz. Os campos foram calculados para um ponto um pouco acima do limite do campo próximo. A já conhecida expressão analítica para a distância ($z_n = D^2/4\lambda$) proporciona os valores de 66, 7, 150 e 233 mm para as frequências de 1, 0, 2, 25 e 3, 5 MHz, respectivamente. Essas distâncias encontram-se perto dos valores observados nos gráficos de pressão axial. Portanto, os resultados estão de acordo com a solução analítica relatada na literatura. Além disso, o erro relativo da pressão foi calculado comparando a simulação do campo acústico com a solução da integral de King. A concordância quantitativa entre essas soluções numéricas melhora quando aumenta a distância entre o ponto de análise sobre o campo de propagação e a superfície do transdutor. O erro obtido ao comparar a integral de King com a solução analítica do campo de pressão axial mostra que a concordância é bastante boa ao longo do eixo do pistão.

4.2 Discussão

Os resultados mostraram que o uso da implementação baseada em GPU foi vantajosa na maioria dos experimentos. O desempenho relativo foi influenciado pelo número de elementos da superfície de emissão. Assim, é possível determinar, a partir da Fig. 2, que o número de elementos mínimo para conseguir um ganho no desempenho relativo é de aproximadamente 1000.

Além disso, uma estimativa do tempo de execução da solução baseada em GPU pode ser obtida a partir dos valores de desempenho presentes na Tabela 1. Através de uma análise visual da Fig. 3 nota-se que a GPU atingiu um valor máximo de GFLOPS nos experimentos, portanto pode-se estimar que o desempenho para frequências superiores seja aproximadamente 50. Finalmente, os resultados podem ser extrapolados para diferentes valores de *pps*, assumindo que o número de elementos é um fator essencial para o tempo de execução dos algoritmos.

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Foi implementada uma solução baseada em GPU para a determinação do campo acústico produzido por um transdutor ultrassônico circular excitado harmonicamente. Considerou-se uma faixa de frequências de 0, 25 a 5, 0 MHz

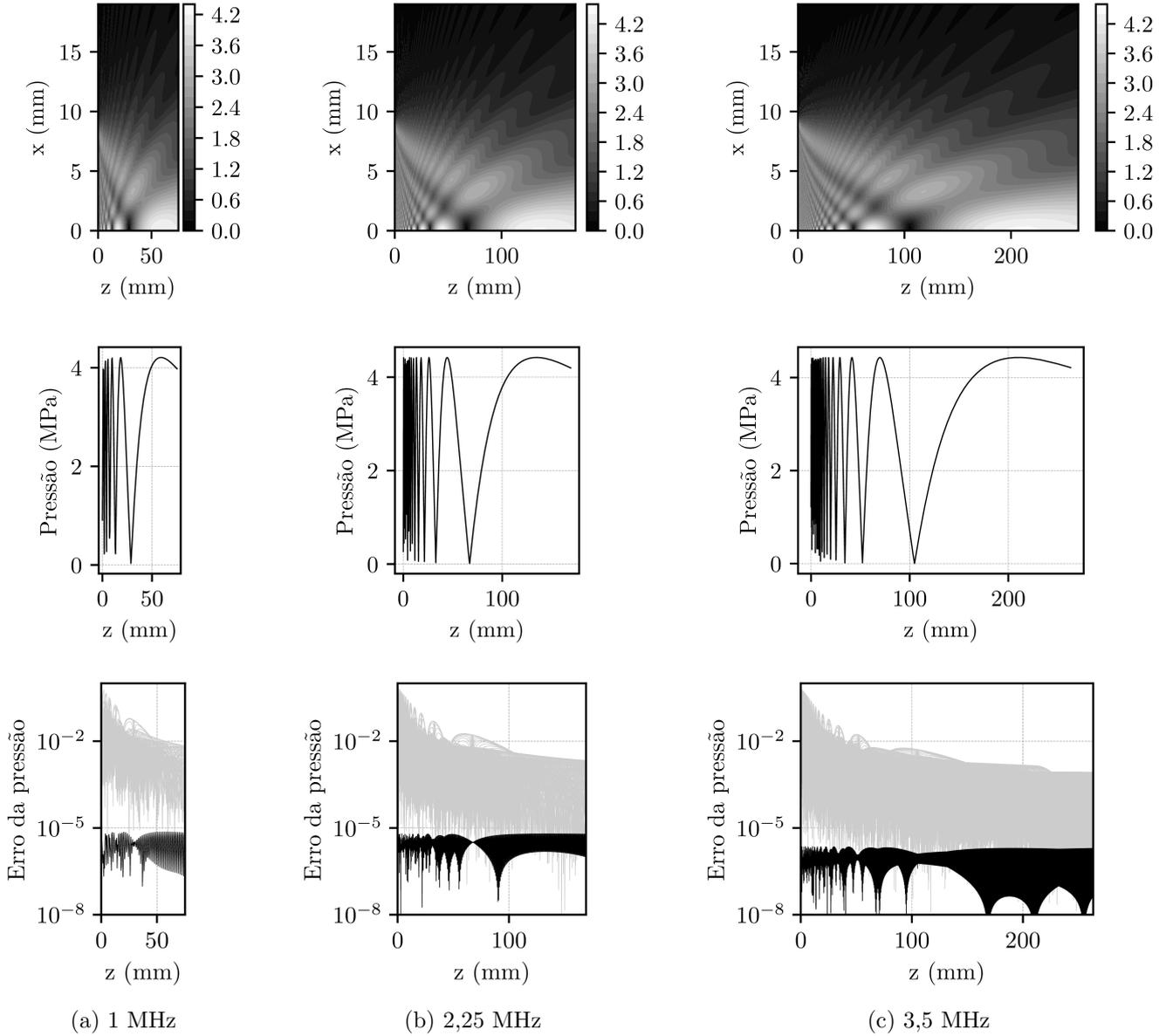


Figura 4. Fila superior: campo de pressão absoluta para diferentes frequências (em MPa). Fila do meio: campo de pressão axial. Fila inferior: erro relativo sobre o domínio (múltiplas linhas cinzas, todos os pontos com o mesmo valor de z são plotados com a mesma coordenada horizontal) e erro comparativo ao longo do eixo de simetria do transdutor (em preto).

para as simulações implementadas e os resultados indicaram que a solução proposta superou a implementação da CPU em todos os testes, exceto um. A versão do algoritmo para GPU foi 50 vezes mais rápida para altas frequências. Os resultados podem ser utilizados para determinar se a GPU contribuirá para a simulação e inclusive para estimar o desempenho. Como um trabalho futuro, as excitações harmônicas podem ser combinadas para gerar funções mais genéricas.

AGRADECIMENTOS

Este projeto é apoiado pela Petrobras/ANP concessão 5850.0108871.18.9. A. Lemos D. é apoiado pela CAPES. A. K. Sato e A. M. Silva Jr são apoiados pela FUSP/Petrobras. M. S. G. Tsuzuki, J. C. Adamowski e

T. C. Martins foram parcialmente suportado pelo CNPq (proc. 311.195/2019-9).

REFERÊNCIAS

- Adamowski, J.C., Buiochi, F., Tsuzuki, M.S.G., Pérez, N., Camerini, C.S., and Patusco, C. (2013). Ultrasonic measurement of micrometric wall-thickness loss due to corrosion inside pipes. In *IEEE Int Ultrasonics Symp (IUS)*, 1881–1884.
- Diaz, M.A., Solovchuk, M.A., and Sheu, T.W.H. (2018). High-performance multi-GPU solver for describing non-linear acoustic waves in homogeneous thermoviscous media. *Comput Fluids*, 173, 195–205.
- Franco, E.E., Andrade, M.A.B., Adamowski, J.C., and Buiochi, F. (2011). Acoustic Beam Modeling of Ultrasonic Transducers and Arrays Using the Impulse Response

- and the Discrete Representation Methods. *J Braz Soc Mech Sci*, XXXIII(4), 408–416.
- Franco, E.E., Barrera, H.M., and Laín, S. (2015). 2d lid-driven cavity flow simulation using GPU-CUDA with a high-order finite difference scheme. *J Braz Soc Mech Sci*, 37(4), 1329–1338.
- Greenspan, M. (1979). Piston radiator: Some extensions of the theory. *J Acoust Soc Am*, 65(3), 608–621.
- He, C. and Hay, A.E. (1993). Near-field characteristics of circular piston radiators with simple support. *J Acoust Soc Am*, 94(1), 554–561.
- Johnson, J., Douze, M., and Jégou, H. (2019). Billion-scale similarity search with GPUs. *IEEE T Big Data*, 1–1.
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B., and Sanders, J.V. (1999). *Fundamentals of Acoustics, 4th Edition*. John Wiley & Sons.
- Kirkup, S.M. (1994). Computational solution of the acoustic field surrounding a baffled panel by the Rayleigh integral method. *Appl Math Model*, 18(7), 403–407.
- Lebedev, G., Klimenko, H., Kachkovskiy, S., Konushin, V., Ryabkov, I., and Gromov, A. (2018). Application of artificial intelligence methods to recognize pathologies on medical images. *Procedia Comput Sci*, 126, 1171–1177.
- Mehra, R., Raghuvanshi, N., Savioja, L., Lin, M.C., and Manocha, D. (2012). An efficient GPU-based time domain solver for the acoustic wave equation. *Appl Acoust*, 73(2), 83–94.
- Nvidia (2018). CUDA C programming guide. Technical Report PG-02829-001_v9.1, Nvidia.
- Patrício, D.I. and Rieder, R. (2018). Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Comput Electron Agr*, 153, 69–81.
- Piwakowski, B. and Delannoy, B. (1989). Method for computing spatial pulse response: Time-domain approach. *J Acoust Soc Am*, 86(6), 2422–2432.
- San, J.E., Medina, M., Buiocchi, F., and Adamowski, J.C. (2006). Numerical modeling of a circular piezoelectric ultrasonic transducer radiating in water. In *ABCM Symposium Serie in Mechatronics*, volume 2, 458–464.
- Treeby, B.E. and Cox, B.T. (2010). k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. *J Biomed Opt*, 15(2), 021314.
- Tsiakas, K.T., Trompoukis, X.S., Asouti, V.G., and Giannakoglou, K.C. (2019). Shape optimization of wind turbine blades using the continuous adjoint method and volumetric NURBS on a GPU cluster. In E. Minisci, M. Vasile, J. Periaux, N.R. Gauger, K.C. Giannakoglou, and D. Quagliarella (eds.), *Advances in Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control in Engineering and Sciences*, 131–144. Springer International Publishing, Cham.
- Wang, L., Spurzem, R., Aarseth, S., Nitadori, K., Berczik, P., Kouwenhoven, M.B.N., and Naab, T. (2015). nbody6++gpu: ready for the gravitational million-body problem. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(4), 4070–4080.
- Wang, X., Yin, H., Li, K., and Zhang, C.H. (2018). Implementing acoustic radiation force imaging on GPU using OpenCL. In *ICNC-FSKD 2017 - 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 832–836.
- Weight, J.P. (1984). Ultrasonic beam structures in fluid media. *J Acoust Soc Am*, 76(4), 1184–1191.