

Manipulação Acústica com Matriz Ultrassônica

Victor Henrique Salvi e Leandro José Cassol

Resumo—Este artigo apresenta um dispositivo sem peças móveis capaz de manipular partículas em um plano utilizando apenas uma matriz de transdutores ultrassônicos. Por meio do controle de fase em cada elemento, aliado ao funcionamento não ressonante, é possível gerar lentes virtuais que focam as ondas mecânicas em uma posição arbitrária. A capacidade do dispositivo é avaliada experimentalmente em relação à exatidão do posicionamento, velocidade máxima e espaço de trabalho.

Palavras-Chave— acoustic levitation, acoustic manipulation, acoustics, contactless handling, phased array, transducer array, ultrasonic

I. INTRODUÇÃO

M

ANIPULAÇÃO com contato físico pode implicar em diversas dificuldades como danos em transporte de objetos frágeis [Guelpa 2016], contaminação de amostras [Santesson 2004], dificuldades com adesão superficial de micro objetos [Suhami 2020] e danos por compressão em micro montagem [Xu 2013]. A Manipulação sem contato é uma alternativa para superar tais dificuldades. Em uma comparação entre oito métodos aplicados a alvos cuja dimensão é na ordem de milímetros ou menor [Vandaele 2005], a manipulação acústica foi considerada mais promissora, porque exige poucos requisitos quanto ao tamanho e formato do objeto e características do material e do meio, além de ter baixa complexidade e apresentar boa capacidade de manipulação. Essa conclusão é ratificada em [Santesson 2004].

O método mais comum de manipulação acústica utiliza ondas estacionárias cuja diferença de pressão atrai partículas menores que metade do comprimento de onda para os nós, podendo ter forma de operação ressonante ou não ressonante [Marzo 2020]. A primeira produz maiores forças, mas exige que o sistema seja ajustado para manter a frequência ressonante do transdutor, sendo sensível a temperatura, ao tamanho do objeto levitado e a distância entre emissor-refletor [Andrade 2010]. A segunda, por outro lado, se destaca por ser mais flexível quanto à fabricação e por oferecer mais liberdade na geração de campos dinâmicos [Drinkwater 2016]. Neste artigo, iremos focar no modo não ressonante devido à sua flexibilidade. Existem também métodos que utilizam apenas a

interferência entre várias ondas para criar um formato de campo acústico que permite manipulação um elemento acústico [Marzo 2015], porém sua complexidade é maior.

Quanto à configuração dos elementos acústicos, pode-se utilizar fontes de radiação com foco fixo (a localização da onda estacionária é constante), em que a manipulação ocorre alterando a frequência de operação (em consequência, o comprimento de onda e localização dos nós) [Kozuka 2000 (standing wave)] ou utilizando a superposição de mais de uma fonte, transladando objetos ao alterar a fase relativa entre elas [Kozuka 2000 (tree-dimentional)]. Trabalhos mais recentes utilizam matriz de transdutores com controle de fase, cuja potência acústica é dividida entre pequenos elementos. Elas são mais flexíveis porque possibilitam manipulação pela alteração da localização da onda estacionária [Hoshi 2014] e apresentam grande aplicabilidade [Ochiai 2014, Hoshi 2010]. Devido à flexibilidade, maior tolerância na fabricação e melhor disponibilidade dos transdutores, iremos focar na configuração de matriz de transdutores.

Este trabalho propõe a manipulação acústica utilizando uma matriz de transdutores com controle individual de fase no modo não ressonante, possibilitando a geração de lentes virtuais que focam as ondas em uma posição arbitrária. Associado a um refletor paralelo, uma onda estacionária se forma no ponto focal pela superposição da onda emitida e refletida. Enquanto diversos estudos utilizam matrizes opostas com manipulação em três dimensões, decidimos validar o conjunto matriz-refletor para manipulação em duas dimensões por que: 1) A inserção e remoção das amostras são mais simples; 2) O refletor pode ser algo relevante para a aplicação, como uma placa de circuitos para posicionamento dos componentes; 3) O sistema com refletor apresenta grande estabilidade lateral, alcançando altas velocidades de deslocamento e movimentando até partículas ligeiramente maiores que metade do comprimento de onda.

Na seção Metodologia serão descritos o princípio de funcionamento, considerações da escolha do *hardware*, arquitetura do software e procedimento de calibração. Na Resultados, a capacidade do dispositivo avaliada experimentalmente é apresentada, seguida da comparação com trabalhos relacionados e limitações, na Discussão. Por fim, a Conclusão encerra o artigo e apresenta trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

A. Força Gerada por uma Onda Estacionária

Considerando uma partícula esférica compressível em um fluido ideal cujo raio é muito menor que o comprimento de onda, Gor'Kov descreveu uma solução analítica para a força

Este artigo foi apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia da Computação da Universidade La Salle Canoas.

Victor Henrique Salvi e Leandro José Cassol estão com a Universidade La Salle, Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil (e-mail: victorsvi@gmail.com; leandro.cassol@unilasalle.edu.br).

Este artigo possui material suplementar disponibilizado pelo autor, em https://drive.google.com/drive/folders/1f1aj_krr_vxY0ZgB1_JMHjJBXf4I3k4?usp=sharing.

agindo nessa esfera em um campo acústico, desconsiderando efeitos de reflexão onda-objeto [Gorkov 1962]. Essa solução determina que a força \vec{F} depende do potencial da força acústica U .

$$\vec{F} = -\nabla U \quad (1)$$

O potencial depende do raio da esfera R , da densidade do meio ρ e da velocidade do som no meio c e é definido por:

$$U = 2\pi R^3 \rho \left[\frac{p_{in}^2}{3\rho^2 c^2} f_1 - \frac{|\vec{v}_{in}|^2}{2} f_2 \right] \quad (2)$$

Os termos p_{in} e \vec{v}_{in} são respectivamente a pressão e velocidade de primeira ordem geradas pela onda. Os fatores f_1 e f_2 estão relacionados com as propriedades da esfera e do meio, em que ρ_0 e c_0 representam a densidade e velocidade do som da esfera, respectivamente.

$$f_1 = 1 - \frac{c^2 \rho}{c_0^2 \rho_0} \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_0 - \rho)}{2\rho_0 + \rho} \quad (4)$$

Considerando que o meio é o ar e que a densidade do objeto é muito maior que a densidade do meio, pode-se simplificar a equação executando a aproximação $f_1 = f_2 = 1$ [Andrade 2018 review], tornando o potencial proporcional a R^3 . Como a força gravitacional é proporcional à massa da esfera, pode-se concluir que a densidade do objeto é um fator limitante para levitação em um campo acústico com intensidade constante. Outra conclusão é que tanto o potencial quanto a força gravitacional são proporcionais a R^3 , logo o raio não é um fator limitante para a levitação, mantendo a densidade constante e respeitando a relação entre raio e comprimento de onda [Andrade 2018 review].

B. Controle da Fase

A principal vantagem da matriz de transdutores é a capacidade de gerar interferência construtiva ou destrutiva em determinadas regiões do campo acústico, ajustando a fase de cada transdutor individualmente ou de grupos de transdutores. Essa técnica é muito utilizada em equipamentos médicos e já foi aplicada para gerar elementos acústicos holográficos [Marzo 2015], displays tácteis [Hoshi 2010] e alto-falantes direcionais [Akahori 2014]. O controle deste trabalho tem o objetivo de gerar um ponto focal, sendo semelhante a [Hoshi 2014].

O dispositivo possui um sistema de coordenadas cartesiano cuja origem é o canto frontal esquerdo, na superfície do transdutor, ilustrado na Fig. 1 (a). Cada elemento da matriz tem uma posição conhecida e constante \vec{p}_n entre a origem e o centro do transdutor. Para focar em uma coordenada (x, y, z) , calcula-se a posição do foco \vec{f} e em seguida a distância entre cada transdutor e o foco \vec{d}_n :

$$\vec{d}_n = \vec{f} - \vec{p}_n \quad (5)$$

A partir do resultado de (5) e do comprimento de onda λ , calcula-se a variação de fase $\Delta\theta_n$ ocorrida no percurso em domínio $[0, 2\pi]$:

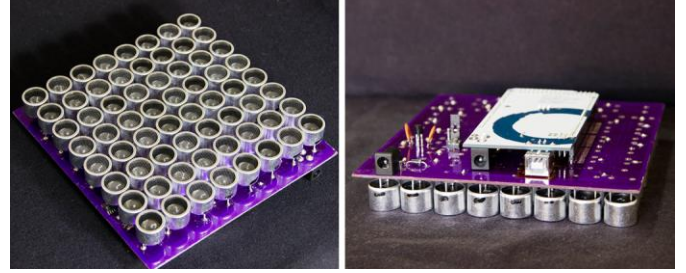
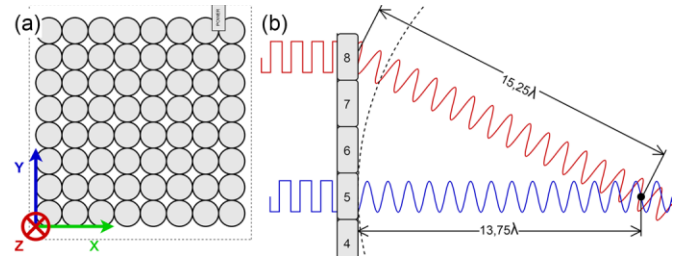


Fig. 2. Matriz de transdutores desenvolvida. As dimensões da placa de circuito são 140 mm x 150 mm.

$$\Delta\theta_n = 2\pi \cdot ((d_n/\lambda) \bmod 1) \quad (6)$$

Por fim, cada elemento terá um atraso de fase de tal forma que não ocorra variação de fase no percurso. A fase de cada transdutor θ_n é obtida por:

$$\theta_n = 2\pi - \Delta\theta_n \quad (7)$$

C. Elementos Acústicos

O sistema desenvolvido é composto por dois elementos acústicos, uma matriz de transdutores e um refletor. A geometria escolhida posiciona a matriz na horizontal, acima do refletor, que é a superfície sobre a qual a manipulação irá ocorrer. O refletor deve ser plano para que a gravidade não influencie o movimento e pode ser constituído de qualquer material não acusticamente absorvente. No experimento realizado, utilizou-se uma mesa de madeira (MDF).

Uma matriz côncava atinge uma força sobre o objeto 50% maior se comparada com uma plana [Marzo 2017]. Entretanto, o campo de trabalho paralelo à matriz é diminuído e a força exercida é reduzida à medida que o foco se afasta do centro. Com objetivo de maximizar o campo de trabalho e uniformizar a força exercida na partícula, adotou-se a geometria plana. A matriz, apresentada na Fig. 2, é composta por 64 transdutores divididos um arranjo 8x8, separados entre si por 1 mm. A largura do arranjo é de 135 mm.

Para escolha dos transdutores, existem dois fatores importantes: 1) A frequência de operação irá limitar o tamanho do objeto, que se restringe à metade do comprimento de onda. Além disso, quanto maior a frequência, maior será a resolução espacial; 2) A intensidade sonora irá afetar a densidade máxima do objeto. Quanto maior a intensidade, maior será a densidade máxima. Os transdutores utilizados foram do modelo TCT40-16T-2, com frequência de 40 kHz, 16 mm de diâmetro, intensidade sonora de 120 dB a 30 cm de

distância excitado com 10 V_{RMS} e ângulo do feixe de 50° (-6 dB).

D. Componentes Eletrônicos

Para gerar os sinais aos transdutores, é comum utilizar FPGA, devido ao elevado número de pinos de E/S e execução paralela [Hoshi 2010, Akahori 2014, Ochiai 2014]. Sistemas baseados em microcontroladores, como o Ultrino [Marzo 2018], também demonstram grande capacidade [Prisbrey 2018, Omirou 2015].

Priorizando o custo, facilidade de uso e disponibilidade de venda, selecionou-se o Arduino Mega para controlar os canais da matriz. Como ele possui mais de 64 pinos de E/S, não é necessário utilizar multiplexadores. Entretanto, trabalhando a 16 MHz, a resolução de fase máxima é limitada.

A onda quadrada de cada canal é amplificada por um driver MOSFET com configuração *push-pull* e pode atingir até 18 V_{PP}.

E. Software

A arquitetura do software é dividida em quatro partes integradas: 1) Atualização das saídas; 2) Cálculo de foco; 3) Cálculo de trajetória; 4) Programa principal.

Calcula-se a fase de cada canal para focar em uma coordenada, codificando o formato da onda do canal em um inteiro de 8 bits, assim como [Marzo 2018], ilustrado na Fig. 3. Esses formatos são convertidos para um buffer em que são armazenados os estados das portas em cada pedaço do período.

1) Atualização das saídas

Parte responsável por ler o buffer e atualizar o estado das portas. Ela é implementada em linguagem assembly porque a sincronia do sinal é baseada na quantidade de instruções executadas (ciclos do processador). Com o relógio a 16 MHz, este código executa um período em exatamente 50 ciclos para permitir atualizar as saídas a 320 kHz, dividindo o período do sinal de 40 kHz em 8 pedaços (resolução de fase).

2) Cálculo de foco

Responsável por calcular os atrasos de fase para alcançar um objetivo, aplicando uma compensação de fase (discutida no tópico Calibração). Foram desenvolvidos um modo que foca no infinito (todos os elementos com fase zero) e um modo que foca em uma coordenada arbitrária no espaço. Ela pode ser estendida para gerar outros tipos de campos acústicos.

3) Cálculo de trajetória

Efetua o cálculo de uma trajetória, com determinada resolução espacial, definida como 1 mm. Cada passo da trajetória tem o foco calculado e armazenado no buffer, que suporta até 85 passos. Foi elaborado o deslocamento linear, mas outros tipos de trajetória podem ser adicionados.

4) Programa principal

A matriz é controlada por meio de comandos enviados por comunicação serial. O programa principal efetua o controle do estado de operação do dispositivo e interpreta os comandos recebidos. Suporta-se os modos de operação de foco no infinito, de foco instantâneo em uma coordenada e de mover o foco para uma coordenada. Também é possível especificar a intensidade do sinal (de 0 a 100%, com resolução de 25%) e a velocidade de deslocamento.

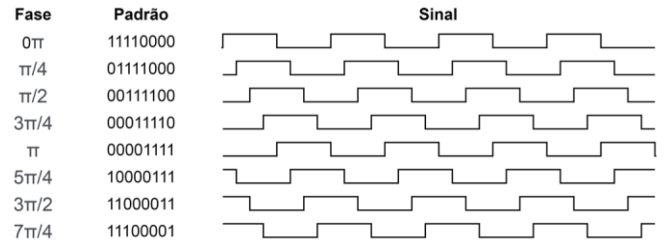


Fig. 3. Codificação dos sinais possíveis com resolução de fase de $\pi/4$ e potência em 100%. A variação de intensidade é efetuada variando o tempo de sinal em nível alto.

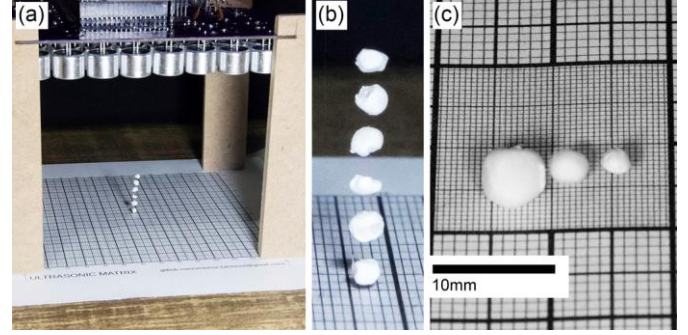


Fig. 4. (a) Levitando 6 esferas de poliestireno com foco no centro da área de trabalho. (b) Imagem da levitação ampliada. (c) Diâmetro das partículas testadas, da esquerda para direita: 5,5 mm, 3,5 mm, 2,5 mm.

F. Calibração

O controle da fase de cada elemento é o aspecto de maior importância em uma matriz de transdutores. Para viabilizar o uso de transdutores com tolerâncias brandas, o sistema suporta uma compensação de fase. Emitindo um sinal sincronizado em todos os elementos da matriz, mede-se a diferença de fase entre o sinal de controle e o sinal detectado por transdutor conectado a um osciloscópio. Os dados coletados são informados no software.

O mapeamento entre pino do microcontrolador e localização do transdutor na matriz é parametrizável no software para permitir maior flexibilidade no layout da placa de circuito impresso.

III. RESULTADOS

O dispositivo desenvolvido foi capaz de gerar 64 sinais de 40 kHz com resolução de $\pi/4$, possibilitando a levitação e translação de partículas. Os experimentos foram conduzidos excitando os transdutores com uma tensão de 15 V_{PP}, consumindo uma corrente de cerca de 250 mA, equivalente a 3,75 W de potência. A matriz foi posicionada com o topo dos transdutores a 115 mm acima do refletor, como evidente na Fig. 4 (a).

A. Partícula

Foram levitadas partículas de poliestireno expandido, com densidade de aproximadamente 30 Kg/m³. Partículas cujo diâmetro é menor que $\lambda/2$ (as duas esferas menores da Fig. 4 (c)) são levitadas próximas ao refletor e podem ser transladadas, seguindo a posição no plano especificada. Já partículas cujo diâmetro é maior (esfera maior da Fig. 4 (c)) não puderam ser levitadas, mas uma com diâmetro de 5,5 mm

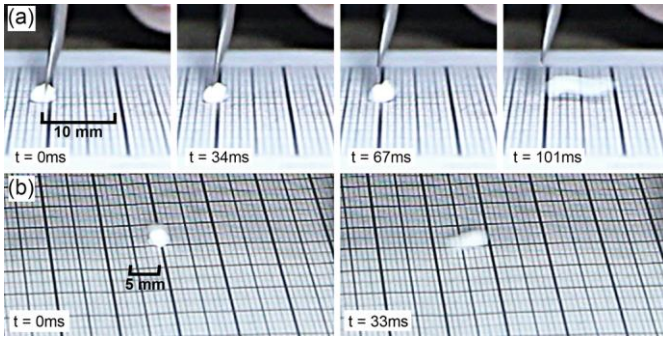


Fig. 6. (a) Aceleração da esfera após ser afastada em 10 mm à esquerda da posição de equilíbrio. (b) Aceleração a partir do repouso em um deslocamento para a esquerda.

pôde ser transladada com velocidade e precisão significativamente reduzidas.

B. Área de Trabalho

O comprimento do lado da matriz quadrada, medindo entre as laterais externas dos transdutores, é de 135 mm. A amplitude é ligeiramente reduzida à medida que o foco se afasta do centro, implicando em: 1) Em distâncias menores que 10 mm da borda externa, a partícula apresenta perda de estabilidade, ficando mais suscetível a oscilações; 2) Em distâncias menores que 5 mm da borda, ocorre perda de exatidão espacial, a partícula é eventualmente ejetada e não é mais possível movê-la em direção ao centro; 3) Fora da área delimitada pelos transdutores, a partícula é ejetada. Todos os outros experimentos foram efetuados com mais de 10 mm de distância das bordas.

C. Força

Dois experimentos foram realizados para estimar a força lateral. Em uma situação em que o ponto focal é estático, afastou-se uma esfera de 3,5 mm de diâmetro de sua posição de equilíbrio em 10 mm, com uma pinça, aparente na Fig. 6 (a). Observando que a restauração para a posição de equilíbrio leva 0,101 s e considerando aceleração constante, estimou-se a aceleração em $1,96 \text{ m/s}^2$ e a força em 1,3 nN.

Na outra situação, em que o ponto focal é dinâmico, movimentou-se a mesma esfera para a esquerda pelo deslocamento do ponto focal, demonstrado na Fig. 6 (b). A partir do repouso, ela desloca-se 5 mm em 0,033 s. Considerando aceleração constante, estimou-se a aceleração em $9,18 \text{ m/s}^2$ e a força em 6,2 nN. Note que o valor apresetado é uma estimativa, pois na prática a força irá depender da distância ao ponto focal.

Também se testou a distância máxima do foco que faz uma partícula ser atraída, que foi de 14 mm.

D. Velocidade

As medidas de velocidade foram obtidas utilizando uma câmera para medição do tempo de deslocamento. Velocidades médias de até 15 cm/s podem ser desenvolvidas com ótima reprodutibilidade. A máxima registrada foi de 19 cm/s, em um movimento da coordenada (100,50) para (30,50), entretanto algumas vezes a partícula não acompanhou o foco. Velocidades maiores que 20 cm/s não conseguem aplicar a

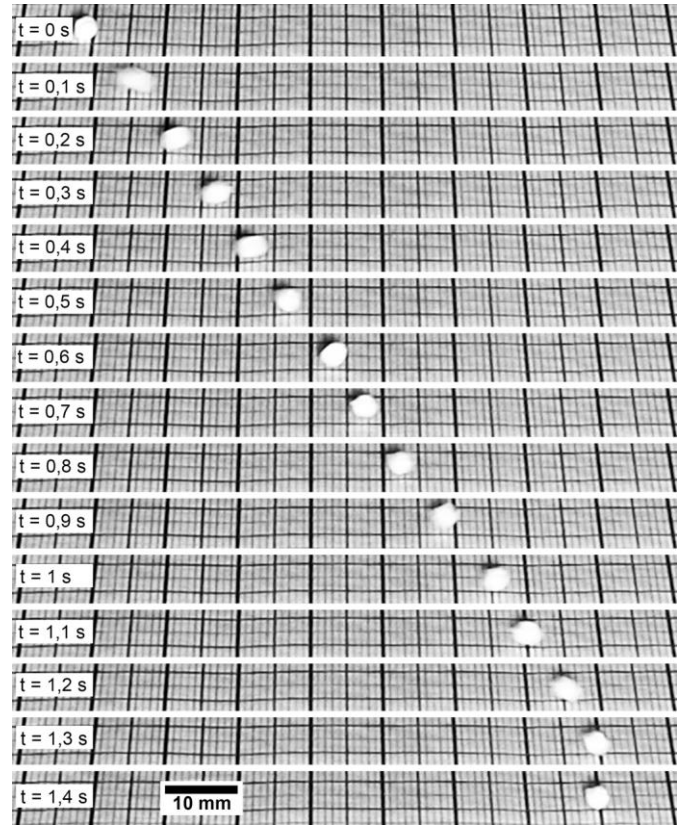


Fig. 5. Deslocamento da coordenada (30,50) para (100,50) a 5,5 cm/s.

aceleração adequada para vencer a inércia da partícula. A Fig. 5 apresenta um deslocamento de 70 mm com velocidade média de 5,5 cm/s.

E. Exatidão

A exatidão no posicionamento espacial foi medida utilizando um papel com uma régua impressa com resolução de 0,5 mm. Com uma esfera de 2,5 mm de diâmetro, a oscilação lateral máxima em um período de observação de 10 s foi menor do que a resolução da medição.

O erro de posicionamento após deslocamento foi medido utilizando a mesma técnica, apresentando erro de posicionamento espacial menor que a resolução da medição, 0,5 mm. A Fig. 7 exibe um deslocamento de 10 mm, cuja origem e destino no eixo horizontal estão destacadas.

F. Efeitos Secundários

O ponto focal tem amplitude máxima no campo acústico. Entretanto, existe amplitude significativa em outras posições, que pode ser problemático em algumas aplicações.

Com a matriz desligada, algumas partículas foram posicionadas na linha $y = 70$ (Fig. 8 (a)). Ao ativar a matriz com o foco em (70, 20), houve pouco distúrbio nas partículas da linha (Fig. 8 (b)). Entretanto, ao movimentar o foco para (70, 100), a maioria das partículas foram deslocadas (Fig. 8 (c)).

IV. DISCUSSÃO

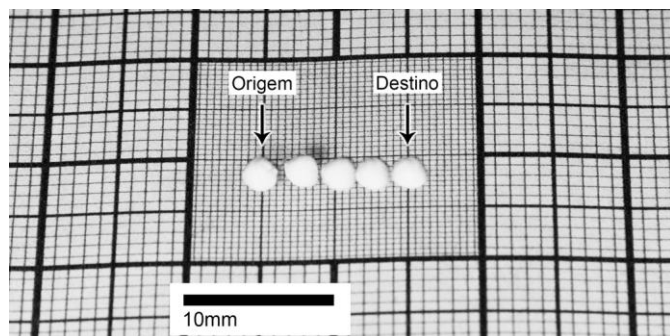


Fig. 7. Superposição de imagens de um deslocamento de 10 mm com destaque à exatidão do posicionamento espacial de uma esfera de 2,5 mm de diâmetro sobre uma régua de resolução 0,5 mm. O erro na posição de origem e destino é menor que 0,5 mm.

Use either SI (MKS) or CGS as primary units. (SI units are strongly encouraged.) English units may be used as secondary n.

V. CONCLUSÃO

The

A.

REFERENCES

Basic format for books:

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of His Published Book*, xth ed. City of Publisher, (only U.S. State), Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx.

Examples:

- [1] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, 2nd ed., vol. 3, J. Peters, Ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64.
- [2] W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA, USA: Wadsworth, 1993, pp. 123-135.
- [3] dsasds

Basic format for periodicals:

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year, DOI. 10.1109.XXX.123456.

Examples:

- [4] J. U. Duncombe, "Infrared navigation—Part I: An assessment of feasibility," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-11, no. 1, pp. 34-39, Jan. 1959, 10.1109/TED.1959.5562840.
- [5] E. P. Wigner, "Theory of traveling-wave optical laser," *Phys. Rev.*, vol. 134, pp. A635-A646, Dec. 1965.
- [6] E. H. Miller, "A note on reflector arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, to be published.

Basic format for reports:

J. K. Author, "Title of report," Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, Rep. xxx, year.

Examples:

- [7] E. E. Reber, R. L. Michell, and C. J. Carter, "Oxygen absorption in the earth's atmosphere," Aerospace Corp., Los Angeles, CA, USA, Tech. Rep. TR-0200 (4230-46)-3, Nov. 1988.

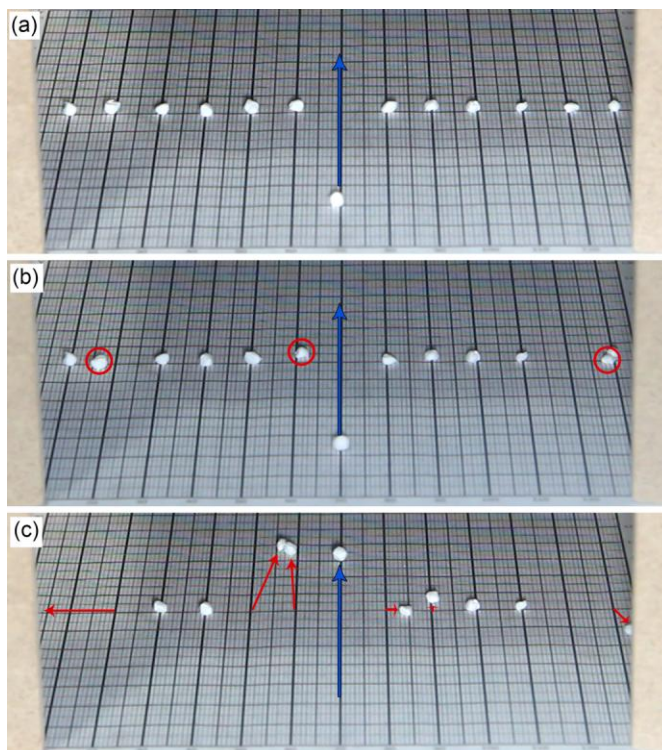


Fig. 8. (a) Posição inicial das partículas com a matriz desligada. (b) Três partículas foram afetadas ao ativar a matriz com foco estático. (c) Várias partículas afetadas ao movimentar o foco.

- [8] J. H. Davis and J. R. Cogdell, "Calibration program for the 16-foot antenna," Elect. Eng. Res. Lab., Univ. Texas, Austin, TX, USA, Tech. Memo. NGL-006-69-3, Nov. 15, 1987.

Basic format for handbooks:

Name of Manual/Handbook, x ed., Abbrev. Name of Co., City of Co., Abbrev. State, Country, year, pp. xxx-xxx.

Examples:

- [9] *Transmission Systems for Communications*, 3rd ed., Western Electric Co., Winston-Salem, NC, USA, 1985, pp. 44-60.
- [10] *Motorola Semiconductor Data Manual*, Motorola Semiconductor Products Inc., Phoenix, AZ, USA, 1989.

Basic format for books (when available online):

J. K. Author, "Title of chapter in the book," in *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher, State, Country: Abbrev. of Publisher, year, ch. x, sec. x, pp. xxx-xxx. [Online]. Available: <http://www.web.com>

Examples:

- [11] G. O. Young, "Synthetic structure of industrial plastics," in *Plastics*, vol. 3, Polymers of Hexadromicon, J. Peters, Ed., 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1964, pp. 15-64. [Online]. Available: <http://www.bookref.com>.
- [12] *The Founders' Constitution*, Philip B. Kurland and Ralph Lerner, eds., Chicago, IL, USA: Univ. of Chicago Press, 1987. [Online]. Available: <http://press-pubs.uchicago.edu/founders/>
- [13] The Terahertz Wave eBook. ZOmega Terahertz Corp., 2014. [Online]. Available: http://dl.z-thz.com/eBook/zomega_ebook_pdf_1206_sr.pdf. Accessed on: May 19, 2014.
- [14] Philip B. Kurland and Ralph Lerner, eds., *The Founders' Constitution*. Chicago, IL, USA: Univ. of Chicago Press, 1987, Accessed on: Feb. 28, 2010, [Online] Available: <http://press-pubs.uchicago.edu/founders/>

Basic format for journals (when available online):

J. K. Author, "Name of paper," *Abbrev. Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, Abbrev. Month, year. Accessed on: Month, Day, year, DOI: 10.1109.XXX.123456, [Online].

Examples:

- [15] J. S. Turner, "New directions in communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 11-23, Jan. 1995.
- [16] W. P. Risk, G. S. Kino, and H. J. Shaw, "Fiber-optic frequency shifter using a surface acoustic wave incident at an oblique angle," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 115-117, Feb. 1986.
- [17] P. Kopyt *et al.*, "Electric properties of graphene-based conductive layers from DC up to terahertz range," *IEEE THz Sci. Technol.*, to be published. DOI: 10.1109/TTHZ.2016.2544142.

Basic format for papers presented at conferences (when available online):

J.K. Author. (year, month). Title. presented at abbrev. conference title. [Type of Medium]. Available: site/path/file

Example:

- [18] PROCESS Corporation, Boston, MA, USA. Intranets: Internet technologies deployed behind the firewall for corporate productivity. Presented at INET96 Annual Meeting. [Online]. Available: <http://home.process.com/Intranets/wp2.htm>

Basic format for reports and handbooks (when available online):

J. K. Author. "Title of report," Company. City, State, Country. Rep. no., (optional: vol./issue), Date. [Online] Available: site/path/file

- [19] Examples:
- [20] R. J. Hijmans and J. van Etten, "Raster: Geographic analysis and modeling with raster data," R Package Version 2.0-12, Jan. 12, 2012. [Online]. Available: <http://CRAN.R-project.org/package=raster>
- [21] Teralyzer. Lytera UG, Kirchhain, Germany [Online]. Available: http://www.lytera.de/Terahertz_THz_Spectroscopy.php?id=home, Accessed on: Jun. 5, 2014

Basic format for computer programs and electronic documents (when available online):

Legislative body. Number of Congress, Session. (year, month day). *Number of bill or resolution, Title.* [Type of medium]. Available: site/path/file

NOTE: ISO recommends that capitalization follow the accepted practice for the language or script in which the information is given.

Example:

- [22] U.S. House. 102nd Congress, 1st Session. (1991, Jan. 11). *H. Con. Res. 1, Sense of the Congress on Approval of Military Action.* [Online]. Available: LEXIS Library: GENFED File: BILLS
- [23]
- [24]

Basic format for patents (when available online):

Name of the invention, by inventor's name. (year, month day). Patent Number [Type of medium]. Available: site/path/file

Example:

- [25] Musical toothbrush with mirror, by L.M.R. Brooks. (1992, May 19). Patent D 326 189
- [26] [Online]. Available: NEXIS Library: LEXPAT File: DES

Basic format for conference proceedings (published):

J. K. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City of Conf., Abbrev. State (if given), Country, year, pp. xxxxxx.

Example:

- [27] D. B. Payne and J. R. Stern, "Wavelength-switched passively coupled single-mode optical network," in *Proc. IOOC-ECOC*, Boston, MA, USA, 1985, pp. 585-590.

Example for papers presented at conferences (unpublished):

- [28] D. Ebehard and E. Voges, "Digital single sideband detection for interferometric sensors," presented at the *2nd Int. Conf. Optical Fiber Sensors*, Stuttgart, Germany, Jan. 2-5, 1984.

Basic format for patents:

J. K. Author, "Title of patent," U.S. Patent x xxx xxx, Abbrev. Month, day, year.

Example:

- [29] G. Brandli and M. Dick, "Alternating current fed power supply," U.S. Patent 4 084 217, Nov. 4, 1978.

Basic format for theses (M.S.) and dissertations (Ph.D.):

a) J. K. Author, "Title of thesis," M.S. thesis, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

b) J. K. Author, "Title of dissertation," Ph.D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., Abbrev. State, year.

Examples:

- [30] J. O. Williams, "Narrow-band analyzer," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Harvard Univ., Cambridge, MA, USA, 1993.
- [31] N. Kawasaki, "Parametric study of thermal and chemical nonequilibrium nozzle flow," M.S. thesis, Dept. Electron. Eng., Osaka Univ., Osaka, Japan, 1993.

Basic format for the most common types of unpublished references:

a) J. K. Author, private communication, Abbrev. Month, year.

b) J. K. Author, "Title of paper," unpublished.

c) J. K. Author, "Title of paper," to be published.

Examples:

- [32] A. Harrison, private communication, May 1995.
- [33] B. Smith, "An approach to graphs of linear forms," unpublished.
- [34] A. Brahms, "Representation error for real numbers in binary computer arithmetic," IEEE Computer Group Repository, Paper R-67-85.

Basic formats for standards:

a) *Title of Standard*, Standard number, date.

b) *Title of Standard*, Standard number, Corporate author, location, date.

Examples:

- [35] IEEE Criteria for Class IE Electric Systems, IEEE Standard 308, 1969.
- [36] Letter Symbols for Quantities, ANSI Standard Y10.5-1968.
- [37]

Article number in reference examples:

- [38] R. Fardel, M. Nagel, F. Nuesch, T. Lippert, and A. Wokaun, "Fabrication of organic light emitting diode pixels by laser-

assisted forward transfer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no. 6, Aug. 2007, Art. no. 061103.

- [39] J. Zhang and N. Tansu, "Optical gain and laser characteristics of InGaN quantum wells on ternary InGaN substrates," *IEEE Photon. J.*, vol. 5, no. 2, Apr. 2013, Art. no. 2600111
- [40]
- [41] Example when using et al.:
- [42] S. Azodolmolky *et al.*, Experimental demonstration of an impairment aware network planning and operation tool for transparent/translucent optical networks," *J. Lightw. Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 439–448, Sep. 2011.
- [43]
- [44]



First A. Author (M'76–SM'81–F'87) and all authors may include biographies. Biographies are often not included in conference-related papers. This author became a Member (M) of IEEE in 1976, a Senior Member (SM) in 1981, and a Fellow (F) in 1987. The first paragraph may contain a place and/or date of birth (list place, then date). Next, the author's educational background is listed. The degrees should be listed with type of degree in what field, which institution, city, state, and country, and year the degree was earned. The author's major field

of study should be lower-cased.

The second paragraph uses the pronoun of the person (he or she) and not the author's last name. It lists military and work experience, including summer and fellowship jobs. Job titles are capitalized. The current job must have a location; previous positions may be listed without one. Information concerning previous publications may be included. Try not to list more than three books or published articles. The format for listing publishers of a book within the biography is: title of book (publisher name, year) similar to a reference. Current and previous research interests end the paragraph.

The third paragraph begins with the author's title and last name (e.g., Dr. Smith, Prof. Jones, Mr. Kajor, Ms. Hunter). List any memberships in professional societies other than the IEEE. Finally, list any awards and work for IEEE committees and publications. If a photograph is provided, it should be of good quality, and professional-looking. Following are two examples of an author's biography.



Third C. Author, Jr. (M'87) received the B.S. degree in mechanical engineering from National Chung Cheng University, Chiayi, Taiwan, in 2004 and the

2004 and the M.S. degree in mechanical engineering from National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, in 2006. He is currently pursuing the Ph.D. degree in mechanical engineering at Texas A&M University, College Station, TX, USA.

From 2008 to 2009, he was a Research Assistant with the Institute of Physics, Academia Sinica, Tapei, Taiwan. His research interest includes the development of surface processing and biological/medical treatment techniques using nonthermal atmospheric pressure plasmas, fundamental study of plasma sources, and fabrication of micro- or nanostructured surfaces.

Second B. Author was born in Greenwich Village, New York, NY, USA in 1977. He received the B.S. and M.S. degrees in aerospace engineering from the University of Virginia, Charlottesville, in 2001 and the Ph.D. degree in mechanical engineering from Drexel University, Philadelphia, PA, in 2008.

From 2001 to 2004, he was a Research Assistant with the Princeton Plasma Physics Laboratory. Since 2009, he has been an Assistant Professor with the Mechanical Engineering Department, Texas A&M University, College Station. He is the author of three books, more than 150 articles, and more than 70 inventions. His research interests include high-pressure and high-density nonthermal plasma discharge processes and applications, microscale plasma discharges, discharges in liquids, spectroscopic diagnostics, plasma propulsion, and innovation plasma applications. He is an Associate Editor of the journal *Earth, Moon, Planets*, and holds two patents.

Dr. Author was a recipient of the International Association of Geomagnetism and Aeronomy Young Scientist Award for Excellence in 2008, and the IEEE Electromagnetic Compatibility Society Best Symposium Paper Award in 2011.

Mr. Author's awards and honors include the Frew Fellowship (Australian Academy of Science), the I. I. Rabi Prize (APS), the European Frequency and Time Forum Award, the Carl Zeiss Research Award, the William F. Meggers Award and the Adolph Lomb Medal (OSA).