

Detecção de Fraturas Ósseas em Fantomas por Espectroscopia de Impedância

Detection of Bone Fractures in Phantoms by Impedance Spectroscopy

Giovanni G. Dalvi¹, Pedro Bertemes Filho²¹Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil²Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brasil

Resumo

A maioria das técnicas de diagnóstico por imagem para detecção de fraturas ósseas utiliza equipamentos que emitem radiação, que pode ser prejudicial à saúde humana, mesmo em pequenas doses. Sem dúvida, estudos são necessários e novas técnicas que busquem a redução dessas exposições ao raio-x. O objetivo deste artigo é desenvolver um fantoma biológico 3D e investigar a sensibilidade de detecção de ossos, inteiro e fraturado, por meio da espectroscopia de impedância elétrica. Além disso, são investigados os efeitos das diferentes posições dos eletrodos na sensibilidade da técnica de medição. As medições foram realizadas por um espectroscópio de impedância comercial da *Zurich Instruments* (modelo HF2IS) na faixa de frequência de 1 kHz a 1 MHz. Quatro eletrodos circulares (modelo MELCTEC) foram usados para conectar o fantoma ao HF2IS. O HF2IS foi inicialmente calibrado medindo um resistor de 100 Ω e 1% de precisão. Vetores de calibração de magnitude e fase foram calculados e então usados para ajustar os dados dos fantomas com e sem osso. Os resultados mostraram que os valores de módulo e fase para o simulador puro e com osso fraturado são bem próximos enquanto para o osso inteiro apresentam notável variação, principalmente em frequências acima de 100 kHz. Observou-se que a distância entre os eletrodos causa um pequeno efeito no módulo de impedância, enquanto as mudanças de fase são mais significativas em alta frequência. Também foi observado que a fase de impedância é mais sensível à geometria do eletrodo com e sem ossos fraturados. Esta pode ser uma ferramenta útil para detecção sem imagem de fraturas de ossos humanos como uma abordagem de baixo custo, não invasiva e não prejudicial à saúde humana.

Palavras-chave: Espectroscopia de impedância elétrica; Fantoma biológico; Fraturas ósseas.

Abstract

Most imaging diagnostic techniques for the detection of bone fractures uses equipment that emits radiation, which can be harmful to human health, even in small doses. Undoubtedly, studies are needed and new techniques are seeking towards the reduction of such x-ray exposures. The aim of this article is to develop a 3D biological phantom in order to investigate the sensitivity of detecting fractured bones by using electrical impedance spectroscopy. Also, it is investigated the effects of different electrode distance to the sensitivity of the measuring technique. Measurements were performed by a commercial Impedance Spectroscopie from Zurich Instruments (model HF2IS) in the frequency range from 1 kHz to 1 MHz. Four circular electrodes (model MELCTEC) were used to connect the phantom to the HF2IS. The HF2IS was firstly calibrated by measuring a 100 Ω resistor and 1% accuracy. Both magnitude and phase calibrated vectors were calculated and then used to adjust the bone-phantom data. The results showed that the values of modulus and phase for the pure simulator and with fractured bone are very close while for the whole bone they present notable variation, mainly in frequencies above 100 kHz. It was observed that the distance between electrodes causes a small effect in the impedance modulus, whereas the phase changes are more significant at high frequency. It was also observed that impedance phase is more sensitive to electrode geometry with and without fractured bones. This might be a useful tool for don't imaging fractures of human bones as a low cost, non-invasive and non-harmful approach human health.

Keywords: Electrical impedance spectroscopy; Biological phantom; Bone fractures.

1. Introdução

Para uma qualidade de vida adequada um dos pontos a ser levado em consideração é a saúde óssea. O osso é um tecido conjuntivo de alta densidade com uma estrutura única (1) e suas propriedades elétricas podem variar dependendo da raça (conteúdo mineral ósseo, formação e remodelação óssea) (2).

Atualmente, existe um grande avanço da tecnologia e diagnósticos por imagem para detecção de fraturas ósseas, sendo usados principalmente raio-x (1), em casos mais específicos de análise dos ossos se faz a densitometria óssea usando a técnica DXA (*Dual Energy Xray Absorptiometry*) (3) que tem por objetivo avaliar o grau de perda mineral óssea, indicar a probabilidade de fratura, possibilitar a obtenção da curva de perda óssea através do tempo

(quando a avaliação é feita periodicamente) e auxiliar no tratamento médico (4,5).

Mesmo causando uma baixa mortalidade, as doenças relacionadas aos ossos podem gerar um impacto significativo no cotidiano das pessoas, além de serem responsáveis por altos custos na saúde (6–8). Outro ponto que pode ser levado em consideração é o risco de morte por câncer, pois sabe-se que ocorre um aumento dos riscos com a exposição a altas doses de radiação, porém os efeitos relacionados a baixas doses de irradiação não estão bem estabelecidos, tendo muitas opiniões conflitantes publicadas nos últimos anos. Algumas fontes estimam que a baixa exposição à radiação causada por imagens médicas pode, no futuro, representar até 2 % dos cânceres nos Estados Unidos da América (9), desta forma a procura por

formas alternativas de análise de fraturas em ossos e o nível de cálcio se torna extremamente importante para a medicina.

Estudos envolvendo seres humanos são muito restritos e em muitos casos praticamente impraticáveis, como é caso do estudo das interações com campo magnético, estudos envolvendo radiação.

Os tecidos biológicos quando expostos a um campo de alta intensidade pode ser comprometidos (10) e causar efeitos estocásticos como câncer (11), por exemplo. Deste modo, faz-se necessário conhecer as doses absorvidas em órgãos e tecidos radio sensíveis. Porém, dado que não se pode expor um indivíduo à tais medições, faz-se necessário o uso de artifícios computacionais e mecânicos, como é o caso do uso de fantasmas (11).

Os objetos simuladores antropomórficos, ou fantasmas, podem ser fabricados com uma grande variedade de materiais, geralmente com características semelhantes aos tecidos biológicos humanos. Dependendo da finalidade dos fantasmas, pode-se escolher os materiais que melhor simulam as aplicações (12).

Na prática, a medição direta da dose de irradiação em órgãos não é possível e, portanto, as doses devem ser estimadas através de experimentos em fantasmas com anatomia bem próximas aos tecidos analisados (13). Dentre os diversos fantasmas já fabricados para pesquisa é possível citar: BABY e CHILD que foram desenvolvidos por ZANKL et al (1988) (14) e ADELAID, um fantoma de 14 anos que foi desenvolvida por CAON et al (1999) (15) ambos utilizados para cálculo de dosimetria por tomografia computadorizada.

Outros exemplos que se pode citar é o desenvolvido por LEE e colegas de trabalho em 2007 na Universidade da Flórida onde conseguiram determinar a dose absorvida em fantasmas de órgão pediátricos de Voxel (16), o mesmo grupo de estudo em 2012 publicaram resultados para fantasmas pediátricos agora híbridos (16).

DONAVAN et al (2012) (17) usaram os fantasmas antropomórficos para realizar medições do risco de câncer induzidos no tratamento de câncer de mama, FERAGALLI et al (2017) (18), SIHONO et al (2017) (19), Gao et al (2019) (20) e LEE et al (2019) (21) fazem um estudo em fantasmas de modo a otimizar os protocolos clínicos da dosagem de radiação que deve ser utilizada na tomografia computadorizada com relação aos órgãos e WESOLOWSKA et al (2019) (22) em um estudo semelhante analisa através de um fantoma a irradiação em órgão de risco (órgãos vizinhos ao alvo) durante seções de radioterapia.

A maior concentração dos estudos em fantasmas se relacionam a radiação, mas os fantasmas também podem ser usados para os estudos de possíveis fraturas em ossos e uma das técnicas que pode ser utilizada para esta detecção é a Bioimpedância Elétrica (BIA). LIAO et al (23) apresenta uma alta precisão entre os resultados obtidos através da BIA e o DXA para avaliação da massa magra e massa gorda e algumas limitações quando se avalia o

conteúdo mineral ósseo em seres humanos. ZHOU e CLYNE (2019) (24) compararam o DXA e a BIA para a composição corporal em pacientes sem diálise com doença renal crônica encontrando uma concordância limitada. CRISPILHO et al (2020) (25) usaram a BIA para análise da associação de altos níveis de fosfato com o conteúdo mineral ósseo.

O objetivo deste artigo é desenvolver um fantoma biológico 3D para investigar a sensibilidade da detecção de ossos internos (sadio e fraturado) usando a espectroscopia de impedância elétrica. Também, será investigado diferentes arranjos geométricos de eletrodos.

2. Materiais e Métodos

A confecção dos fantasmas foi realizada segundo proposta por DUTRA (2018) (26) sendo composta por 2 g de agar-agar, 100 g de gelatina, 2 g de sal e 298 g de água deionizada. Foi utilizada uma balança digital com precisão de 1 g para a pesagem dos componentes.

Após a preparação da gelatina, a mesma foi depositada em três formas cilíndricas de $46,00 \pm 0,02$ mm de diâmetro e $60,00 \pm 0,02$ mm de altura, duas das formas foram adicionados em seu interior um osso de costela suína resfriada, sendo um osso de costela normal e um fraturado, conforme Figuras 1 e 2.



Figura 1 - Osso de costela suína resfriado utilizado no experimento: a) fraturado e b) sem fratura.

As formas foram mantidas em refrigeração por 7 horas antes da realização do experimento. Para a realização do experimento os fantasmas foram retirados de refrigeração e desinformadas 30 minutos antes de modo a climatizar conforme descrito por DUTRA (2018) (26). A sala onde os experimentos foram realizados foi mantida a uma temperatura constante de 24 °C.

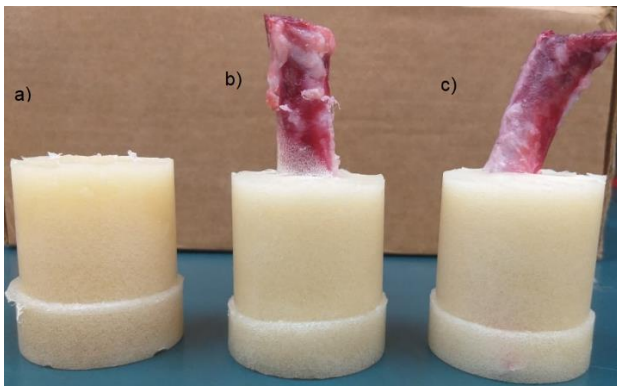


Figura 2 - Cilindros de gelatina utilizados no experimento: a) gelatina pura, b) gelatina com osso sem fratura e c) gelatina com osso fraturado.

Para a medição do espectro de impedância foi utilizado o HF2IS *Impedance Spectroscopy* da Zurich Instruments. A medição foi realizada a 4 fios, de modo eliminar a interferência dos cabos da medição de impedância, com saída de 1 V_{PP} , frequências variando de 100 Hz à 1 MHz, sendo o canal 1 conectado ao bloco HF2TA 0, com ganho 1 e o valor apresentado é resultado médio de 8 medições do equipamento. Foram coletados 200 pontos para cada medição na faixa de frequências de 10 Hz à 5 MHz. As medições foram feitas em duas posições distintas: com os eletrodos que aplicam e medem a diferença de potencial na mesma linha a uma altura da base de $2 \pm 0,05$ cm e paralelo a uma distância de $5 \pm 0,05$ cm na vertical entre os eletrodos, Figura 3.

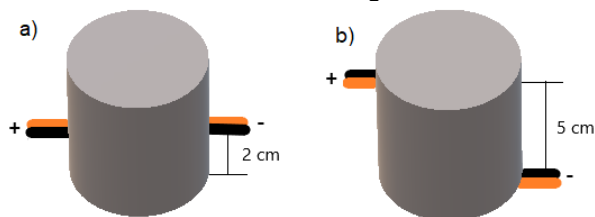


Figura 3 - Posição dos eletrodos utilizadas para a aplicação e medição da diferença de potencial: a) eletrodos na mesma linha a uma altura de $2 \pm 0,05$ cm da base e b) em paralelo com uma distância vertical entre os eletrodos de $5 \pm 0,05$ cm.

Os eletrodos utilizados no experimento são de formato circular de 16 milímetros de diâmetro externo e 8 mm de diâmetro interno (a parte condutora que fica em contato com a amostra) da marca MELCTEC com temperatura de operação de -10 °C até 30 °C, Figura 4.

Para calibração e verificação do equipamento foi realizado um teste preliminar com um resistor de 100Ω e 1 % de precisão.

Após testes com o resistor foi decidido fazer as medidas nos fantasmas com frequência entre 1 kHz e 1 MHz, coletando 100 pontos dentro deste espectro de frequências.



Figura 4 - Eletrodo utilizado no experimento da marca MELCTEC.

3. Resultados

A fim de investigar e mitigar os efeitos parasitários do sistema de medição, teste de calibração foram realizados no fantoma sem o uso dos ossos na faixa de frequência de 1 kHz a 1 MHz. Vetores de calibração da magnitude e fase da impedância foram calculados e usados para ajustar os dados medidos em fantasmas com ossos, como mostram as equações 1 e 2.

$$|Z_{May}| = |Z|_0 / |Z|_i \quad (1)$$

$$\phi_z = \phi_{z_i} - \phi_{z_0} \quad (2)$$

onde “0” representa o valor na frequência de 1 kHz e “i” representa os 100 valores de frequência discretas medidas na faixa de 1 kHz a 1 MHz.

As Figuras 5 e 6 apresentam o módulo e a fase, respectivamente, da impedância das medições nos fantasmas com eletrodos não invasivo em paralelo e distantes $5 \pm 0,05$ cm na vertical entre eles (Figura 3b).

Já as Figuras 7 e 8 apresentam o módulo e a fase, respectivamente, da impedância das medições nos fantasmas com eletrodos não invasivo na mesma linha e distantes $2 \pm 0,05$ cm na da base do fantoma (Figura 3a).

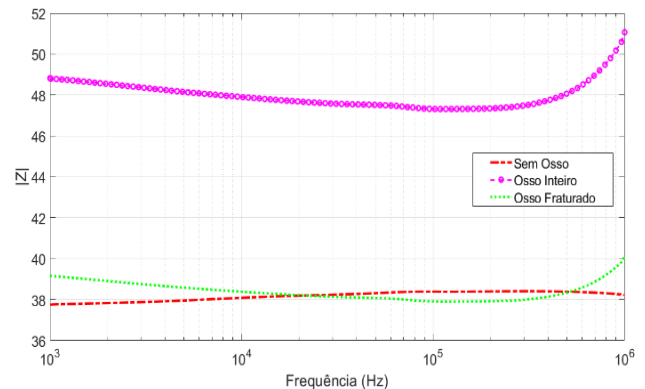


Figura 5 - Módulo da impedância das medições nos fantasmas com eletrodos não invasivo em paralelo e distantes $5 \pm 0,05$ cm na vertical.

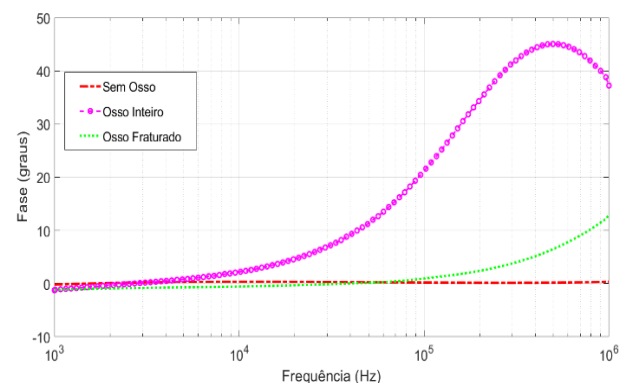


Figura 6 - Fase da impedância das medições nos fantasmas com eletrodos não invasivo em paralelo e distantes $5 \pm 0,05$ cm na vertical.

É possível notar que para frequências na faixa de 100 kHz - 1 MHz em ambos os posicionamentos dos eletrodos (paralelos e na mesma linha) existe um comportamento diferenciado para cada um dos fantasmas (puro, com osso inteiro e com osso fraturado).

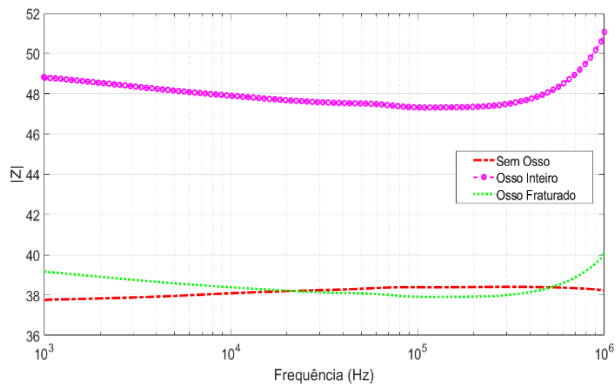


Figura 7 - Módulo da impedância das medições nos fantasmas com eletrodos não invasivo na mesma linha a $2 \pm 0,05$ cm da base do fantoma.

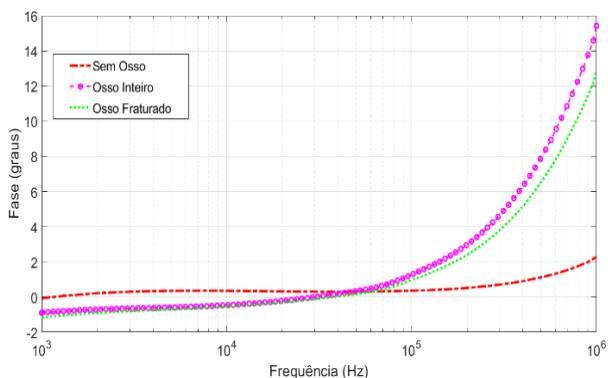


Figura 8 - Fase da impedância das medições nos fantasmas com eletrodos não invasivo na mesma linha a $2 \pm 0,05$ cm da base do fantoma.

Quando a medida é realizada pelos eletrodos em paralelo percebe-se uma maior variação dos valores dos módulos que quando as medidas são realizadas com os eletrodos em mesma linha, estando o resultado coerente com o relatado por BOLFE et al (2007) (27) que em seu trabalho apresenta resultados que a impedância elétrica dos tecidos biológicos é alterada pela localização e distância entre os eletrodos, bem como pela frequência da corrente. Encontrando uma correlação positiva entre a distância intereletrodos para correntes de baixa e média frequência.

Outro ponto a ser levado em consideração é que nos ossos existe água localizada dentro das fibras, nos espaços entre elas e entre as moléculas de tripla-hélice dos ossos. Embora sua influência seja de difícil compreensão, sua presença é fundamental, uma vez que as propriedades mecânicas do osso seco são diferentes do osso fresco. A água é responsável por cerca de 25 % do peso do osso (28). É possível acreditar que ao fraturar o osso, houve o aparecimento de um caminho menos resistivo para a corrente iônica diminuindo o valor da impedância.

Sabe-se que a forma de armazenamento pode afetar as propriedades elétricas (2), espera-se repetir os experimentos com ossos frescos para avaliar se existe prevalência dos resultados apresentados. Além disso, as propriedades dielétricas do tecido ósseo humano podem ser diferentes do tecido animal por diversos fatores como teor de umidade (2) que pode ocasionar mudanças no espectro de impedância.

4. Conclusão

Através do experimento se pode notar uma variação nos fantasmas puro, com osso sem fratura e no osso fraturado, sendo a Bioimpedância uma possibilidade para avaliação de fraturas em ossos, sendo somente necessário ampliação dos testes com ossos frescos e níveis de fratura para avaliação de sua aplicabilidade, tendo como ponto de partida frequências superiores a 100 kHz onde se obteve uma maior variação dos valores tanto do módulo quanto da fase.

Agradecimentos

Os autores agradecem a UDESC pelo apoio institucional, a FAPESC pela compra dos componentes e a CAPES pelo apoio financeiro através de uma bolsa de doutorado.

Referências

- Xiang M, Qi H, Qu Z, Guo J. Scattering of SH waves in compact bone and cancellous bone. *Biomed Signal Process Control*. 2020 May 1;59.
- Williams PA, Saha S. The electrical and dielectric properties of human bone tissue and their relationship with density and bone mineral content. *Ann Biomed Eng*. 1996;24(2):222–33.
- Cral WG, Silveira MQ, Tucunduva RMA, Abujamra RHH, Queluz D de P. Utilização de Índices Radiomorfolométricos em Exames de Imagem. *Rev da Fac Odontol* [Internet]. 2017 [cited 2018 Nov 22];22(1):91–5. Available from: <http://seer.upf.br/index.php/rfo/article/view/6732/4323>
- Lab Tests Online. Cálculo [Internet]. Lab Tests Online. 2007 [cited 2018 Nov 22]. Available from: <https://labtestsonline.org.br/tests/calculo>
- CDAV. Densitometria Óssea [Internet]. Centro de Diagnóstico Água Verde - CDAV. 2017 [cited 2018 Nov 22]. Available from: <http://cedav.com.br/exames-densitometria/>
- Herrero S, Pico Y. Can a healthy life prevent us from postmenopausal osteoporosis? Myths and truths. *PharmaNutrition* [Internet]. 2015 Apr 1 [cited 2018 Nov 21];4(2):45–53. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213434415300438>
- Brunelli AS, Baptista CMS, Dominoni RL, Vargas DM. Diferenças na frequência de osteoporose entre Densitometrias Ósseas (DXA) realizadas no Sistema Único De Saúde (SUS) e na Saúde Suplementar (SS). *Arq Catarinenses Med* [Internet]. 2018 Mar 2 [cited 2018 Nov 21];47(1):47–58. Available from: <http://www.acm.org.br/acm/seer/index.php/arquivos/article/view/229/225>
- Santiago EMD, Vieira FS, Nunes A. Osteoporose: estudo sobre o gasto com medicamentos sob a perspectiva do paciente no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Especialista em Economia da Saúde, 2017, Universidade Federal de Goiás. *Rev Eletrônica Gestão Saúde* [Internet]. 2018 [cited 2018 Nov 21];09(02):247–60. Available from: <http://periodicos.unb.br/index.php/rgs/article/viewFile/29547/pdf>
- Hobbs JB, Goldstein N, Lind KE, Elder D, Dodd GD, Borgstede JP. Physician Knowledge of Radiation Exposure and Risk in Medical Imaging. *J Am Coll Radiol* [Internet]. 2018 Jan 1 [cited 2018 Nov 22];15(1):34–43. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S154614401731089X>
- Amorim DAF. Desenvolvimento de um Fantoma Cerebral para Ressonância Magnética. Instituto Superior de Engenharia do Porto; 2013.
- Lima VJ de M. Desenvolvimento de fantasmas mesh infantis, morfológicamente consistentes com a anatomia humana, para uso em dosimetria. [Recife]: Universidade Federal de Pernambuco; 2011.
- Cruz GB. Construção de simulador antropomórfico de próstata 3D para uso em radioterapia. Universidade de Brasília; 2018.
- Akhlaghi P, Miri Hakimabad H, Rafat Motavalli L. Evaluation of

- dose conversion coefficients for an eight-year-old Iranian male phantom undergoing computed tomography. *Radiat Environ Biophys.* 2015 Jun 17;54(4):465–74.
14. Zankl M, Veit R, Williams G, Schneider K, Fendel H, Petoussi N, et al. The construction of computer tomographic phantoms and their application in radiology and radiation protection. *Radiat Environ Biophys.* 1988 Jun;27(2):153–64.
 15. Caon M, Bibbo G, Pattison J. An EGS4-ready tomographic computational model of a 14-year-old female torso for calculating organ doses from CT examinations. *Phys Med Biol.* 1999;44(9):2213–25.
 16. Lee C, Lee C, Staton RJ, Hintenlang DE, Arreola MM, Williams JL, et al. Organ and effective doses in pediatric patients undergoing helical multislice computed tomography examination. *Med Phys [Internet].* 2007 Apr 26 [cited 2019 Nov 25];34(5):1858–73. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1118/1.2723885>
 17. Donovan EM, James H, Bonora M, Yarnold JR, Evans PM. Second cancer incidence risk estimates using BEIR VII models for standard and complex external beam radiotherapy for early breast cancer. *Med Phys [Internet].* 2012 Sep 11 [cited 2019 Nov 25];39(10):5814–24. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1118/1.4748332>
 18. Feragalli B, Rampado O, Abate C, Macri M, Festa F, Stromei F, et al. Cone beam computed tomography for dental and maxillofacial imaging: technique improvement and low-dose protocols. *Radiol Medica.* 2017 Aug 1;122(8):581–8.
 19. Sihono DSK, Vogel L, Weiß C, Thölking J, Wenz F, Lohr F, et al. Ein 4D-Ultraschall-Tracking-System für die externe Radiotherapie bei Oberbauchläsionen unter Atemanhalt. *Strahlentherapie und Onkol.* 2017 Mar 1;193(3):213–20.
 20. Gao Y, Mahmood U, Liu T, Quinn B, Gollub MJ, Xu XG, et al. Patient-Specific Organ and Effective Dose Estimates in Adult Oncologic CT. *Am J Roentgenol.* 2019 Aug 15;1–9.
 21. Lee L-W, Liao Y-S, Lu H-K, Hsieh K-C, Chi C-C. Performance of Bioelectrical Impedance Analysis in the Estimation of Bone Mineral Content in Healthy Children Aged 6–12 Years. *J Clin Densitom [Internet].* 2019 Mar 15 [cited 2019 Jul 2]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1094695018302671?via%3Dihub>
 22. Wesolowska P, Georg D, Lechner W, Kazantsev P, Bokulic T, Tedgren AC, et al. Testing the methodology for a dosimetric end-to-end audit of IMRT/VMAT: results of IAEA multicentre and national studies. *Acta Oncol (Madr) [Internet].* 2019 Dec 2 [cited 2019 Nov 25];58(12):1731–9. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0284186X.2019.1648859>
 23. Liao YS, Li HC, Lu HK, Lai CL, Wang YS, Hsieh KC. Comparison of bioelectrical impedance analysis and dual energy X-ray absorptiometry for total and segmental bone mineral content with a three-compartment model. *Int J Environ Res Public Health.* 2020 Apr 1;17(7).
 24. Zhou Y, Höglund P, Clyne N. Comparison of DEXA and Bioimpedance for Body Composition Measurements in Nondialysis Patients With CKD. *J Ren Nutr.* 2019 Jan 1;29(1):33–8.
 25. Crispilho SF, Bezerra KS, Dalboni MA, Pereira RMR, Elias RM, Moyses RMA. Bioimpedance Underestimates Bone Mineral Content in Association With High Levels of Phosphate [Internet]. Vol. 30, *Journal of Renal Nutrition.* W.B. Saunders; 2020 [cited 2020 Jun 26]. p. 85–6. Available from: <http://www.jrnjournal.org/article/S1051227619300603/fulltext>
 26. Dutra D. Modelagem numérica do efeito de aplicação de força em fantasmas de material biológico usando espectroscopia de impedância elétrica [Internet]. Universidade do Estado de Santa Catarina; 2018 [cited 2020 Jan 26]. Available from: <http://sistemabu.udesc.br/pergamumweb/vinculos/00005a/00005a00.pdf>
 27. BOLFE VJ, RIBAS SI, MONTEBELO MIL, GUIRRO RRRJ. Comportamento da impedância elétrica dos tecidos biológicos durante estimulação elétrica transcutânea. *Rev Bras Fisioter.* 2007 Mar;11(2):153–9.
 28. Matusin DP. Caracterização de osso cortical bovino in vitro por parâmetros ultrassônicos de reflexão [Internet]. [Rio de Janeiro]: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2016 [cited 2020 Jul 20]. Available from: http://www.peb.ufrj.br/teses/Tese0230_2016_01_06.pdf

Contato:**Giovanni Gueler Dalvi**

Universidade do Estado de Santa Catarina,
Departamento de Engenharia Elétrica,
Lab. de Instrumentação Eletrônica e Biomédica,
Rua Paulo Malschitzki, 200, Zona Industrial Norte,
Joinville / SC, CEP: 89219-710.

E-mail: giovanni.dalvi@edu.udesc.br