

Um Novo Tomógrafo por Micro-Ondas para Imageamento da Mama Utilizando Braços Robóticos

Lucas G. Costa* Thiago Campos** Everaldo J. Maciel***
Hugo A. Mendes**** Maryam Liaqat † Emery Lins ‡

* Universidade Federal de Pernambuco, PE, (e-mail: lucas.gallindo.costa@gmail.com).

** Universidade Federal de Pernambuco, PE (e-mail: tcampos@gmail.com)

*** Universidade Federal de Pernambuco, PE (e-mail: jeveraldo3.14@gmail.com)

**** Fundação para Inovações Tecnológicas, PE, (e-mail: hamendes@fitec.org.br).

† University of Okara, Pakistan, (e-mail: drmaryam.liaqat@uo.edu.pk).

‡ Universidade Federal de Pernambuco, PE, (e-mail: emerylins@gmail.com).

Abstract: This work presents a new microwave imaging system for breast imaging that consists of a pair of antennas being automatically positioned around the breast by robotic arms, providing better flexibility to different breast sizes and allowing a bigger number of measurements when compared to other systems in the literature. The system retrieves the outer shape of the breast utilizing a depth camera and uses it to position the antennas. The system was capable of autonomously decide the position of the antennas for two breast phantoms with minimum input from operator.

Resumo: Este trabalho apresenta um novo sistema para imageamento da mama por micro-ondas que consiste de um par de antenas sendo automaticamente posicionadas ao redor da mama por braços robóticos, o que proporciona um maior conforto e flexibilidade a pacientes com mamas de tamanhos diferentes, além de possibilitar um número maior de medições. O sistema utiliza uma câmera de profundidade para obter o formato externo da mama e o utiliza para o posicionamento das antenas. O protótipo foi capaz de decidir o posicionamento das antenas para dois fantasmas de forma semi-autônoma, com mínima intervenção de um operador.

Keywords: microwave imaging; breast cancer detection; medical robotics; multi-robot system; computer vision.

Palavras-chaves: imageamento por micro-ondas; detecção câncer de mama; robótica médica; sistemas multi robô; visão computacional;

1. INTRODUÇÃO

Há alguns anos o imageamento por micro-ondas (sigla em inglês MWI) dos tecidos mamários vem sendo estudado como uma técnica complementar ao diagnóstico do câncer (Aldhaeabi et al., 2020) devido a possibilidade de diagnóstico dado o contraste entre as propriedades dielétricas do tecido saudável e canceroso da mama (Lazebnik et al., 2007). O MWI tem como objetivo reconstruir um mapa de permissividades de uma região sob investigação, aferindo o campo elétrico na sua vizinhança (Pastorino, 2010).

Atualmente mamografia por raios-X é considerada o padrão-ouro para o diagnóstico por imagens do câncer de mama, porém ela apresenta algumas limitações e pontos negativos, como desconforto para a paciente, a taxa de falsos diagnósticos, assim como os riscos da exposição a radiação ionizante. MWI se destaca por sua sensibilidade

e especificidade em discriminar tecidos saudáveis e cancerosos além de utilizar radiação não ionizante de baixa intensidade.

Técnicas de imageamento por micro-ondas se dividem em duas categorias: as técnicas baseadas em radar e as técnicas tomográficas. As técnicas baseadas em radar tratam a reconstrução da imagem como um problema inverso linear e o resultado são imagens que indicam a origem da reflexão dos sinais incidentes. Já as técnicas tomográficas para imageamento por micro-ondas, consistem em obter um mapa da distribuição das propriedades dielétricas obtendo a solução da equação do espalhamento inverso:

$$E(r) = E_{inc}(r) + j\omega\mu_b \int_{V_0} \tau(r')E(r') \cdot \bar{G}\left(\frac{r}{r'}\right) dr' \quad (1)$$

onde $\tau(r) = j\omega[\epsilon(r) - \epsilon_b]$ é a função do objeto ou potencial de espalhamento, E_{inc} é o campo incidente na ausência de um alvo, r é a coordenada espacial das antenas, e r' é uma

coordenada na região a ser investigada V_0 . O objetivo é a solução do problema inverso mal posto do espalhamento encontrando a distribuição da função do objeto τ que contém a distribuição da permissividade (Pastorino, 2010; Tikhonov et al., 2013).

A literatura científica reporta vários protótipos de sistemas para imageamento da mama, em geral os sistemas propostos podem ser divididos em duas configurações: um conjunto de antenas posicionadas em volta da mama em um arranjo circular, variando a altura das antenas (Meaney et al., 2020; Grzegorzczak et al., 2012; Gilmore et al., 2009; Zhurbenko et al., 2010); um conjunto de antenas posicionadas em formato de concha sobre um setor da mama (Preece et al., 2016; Klemm et al., 2008).

Neste trabalho são apresentados resultados preliminares no desenvolvimento de um novo sistema para o imageamento da mama, contendo um conjunto de dois braços robóticos que posicionam as antenas ao redor da mama com o auxílio de uma câmera de profundidade. O intuito da utilização de braços robóticos é: possibilitar um maior conforto à paciente quando comparado a mamografia por raios-X onde há a necessidade de compressão da mama; maior flexibilidade em relação pacientes com mamas de tamanhos diferentes; flexibilizar o posicionamento das antenas, possivelmente aumentando o número de medições quando comparado à outros sistemas de MWI propostos na literatura; obter a superfície externa da mama para posteriormente ser utilizada como informação a priori pelo software de reconstrução. O protótipo construído foi capaz de obter o formato externo de dois fantomas da mama com mínima intervenção de um operador e então decidir automaticamente o posicionamento das antenas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 O Tomógrafo

O tomógrafo proposto é constituído de um conjunto de dois braços robóticos que posicionam as antenas de forma semi-autônoma ao redor de um fantoma da mama. O tomógrafo possui uma câmera de profundidade Intel RealSense utilizada para detectar a superfície da mama. A figura 1 apresenta o aparato experimental com o protótipo construído: 1-Braços robóticos; 2-Fantoma da mama; 3-Câmera de profundidade; 4-Analisador de redes e switches de micro-ondas.

Na imagem 2 observa-se o esquemático para o sistema de controle do tomógrafo em um arranjo que comporta um maior número de braços robóticos que o utilizado neste trabalho. O tomógrafo utiliza microcontroladores para controle dos braços robóticos, e para controlar dois switches de RF do tipo SP8T que possibilitam a conexão de várias antenas simultaneamente. A comunicação entre o computador central e os microcontroladores é feita por rede Ethernet, possibilitando a conexão de vários dispositivos simultaneamente.

No início da operação os braços se encontram em posição de descanso, de forma que não obstruem o campo de visão entre da câmera de profundidade e o fantoma da mama. É necessário então que o operador determine os limites da região sob investigação, uma região que contém

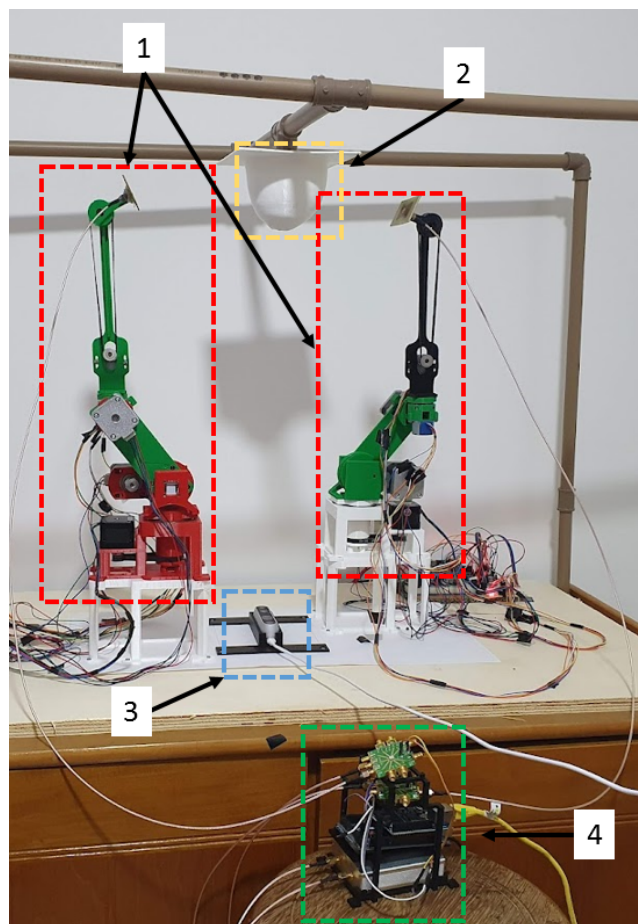


Figura 1. Protótipo do Tomógrafo

a mama por completo, permitindo assim a detecção da superfície da mama. Esta região de interesse é determinada pelo operador selecionando os limites laterais e inferior da superfície de interesse. Tais informações são armazenadas pelo software de controle para posteriormente serem utilizadas pelo software de reconstrução da imagem como informação a priori.

O software do tomógrafo então determina o posicionamento das antenas da seguinte forma: é calculado o ponto central do volume determinado pela superfície do fantoma da mama obtida pela câmera de profundidade e os limites da região sob investigação determinada pelo operador. Então é calculada a maior distância entre o ponto central do volume e a superfície, é adicionado um centímetro a distância encontrada, e por fim é determinado o posicionamento das antenas em um arranjo circular ao redor da mama. A depender do volume da mama, as antenas também podem ser posicionadas num arranjo semiesférico. Os conjuntos de posicionamento dos braços são determinados fazendo uma combinação dois a dois de todas as possíveis posições das antenas.

O controle dos braços robóticos é feito utilizando o Robot Operating System (ROS) (Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al.), uma framework open source para desenvolvimento de robôs. Após o software de controle do tomógrafo determinar todas as possíveis posições das antenas, essas posições são selecionadas duas a cada vez e são repassadas as posições para o ROS. Então é utilizada

a ferramenta MoveIt (Coleman et al., 2014) para efetuar o planejamento do movimento dos braços robóticos, evitando a colisão entre as antenas, os braços robóticos e a mama. Após o fim do posicionamento das antenas, o software de controle efetua a leitura do analisador de redes e armazena o resultado. Por fim, o processo é repetido até serem percorridas todas as possíveis combinações de posições determinadas pelo software. Abaixo observa-se um pseudo algoritmo contendo as etapas feitas pelo software:

Algorithm 1. Etapas do software de controle do tomógrafo

- 1: Leitura do point cloud pela câmera
- 2: Conversão de point cloud para superfície
- 3: Corte da região de interesse
- 4: Calculo de posições das antenas
- 5: **para** Possíveis combinações de posições ← **até faça**
- 6: Mover braços robóticos
- 7: Realizar leitura dos coeficientes de espalhamento
- 8: **fim para**

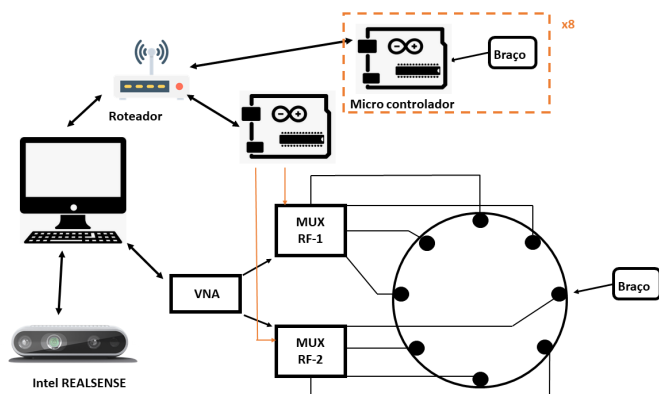


Figura 2. Esquemático do sistema de controle

Para teste do sistema foram utilizados fantasmas da mama fabricados com o auxílio de uma impressora 3D, disponibilizados por Reimer et al. (2020). Tais fantasmas foram gerados a partir de imagens de ressonância magnética. Foram utilizados dois fantasmas de tamanhos diferentes para analisar o posicionamento automático das antenas para diferentes mamas.

2.2 Braços robóticos

Os braços robóticos foram projetados utilizando um software de CAD e fabricados em PLA utilizando uma impressora 3D. Com exceção da última articulação, todos os eixos possuem sensores Hall para detecção de fim de curso e encoders magnéticos AS5600. Os sensores de fim de curso são utilizados na etapa de calibração dos braços robóticos, e os encoders são utilizados para assegurar o movimento preciso das articulações. Todas as articulações utilizam motores de passo, controlados por um microcontrolador.

Já foi reportado na literatura como reflexões indesejadas na estrutura do tomógrafo podem afetar negativamente o algoritmo de reconstrução da imagem (Meaney et al., 2012), então com o intuito de minimizar reflexões nas partes de metal do tomógrafo, o braço foi projetado com sua última seção alongada e com o motor conectado à última articulação por uma correia de borracha, sendo a

última articulação construída com um rolamento de nylon. Desta forma não há partes de metal nas proximidades das antenas, minimizando as reflexões.

2.3 Antenas

Neste trabalho foram utilizadas antenas do tipo Bow-Tie, observadas na imagem 3. As antenas foram projetadas para uma frequência de operação de aproximadamente 2.36GHz, uma frequência adequada para o imageamento da mama. Se observa na imagem 4 a perda de retorno medida da antena. Esta antena possui pequenas dimensões, 45mm por 34mm, o que a torna adequada para o uso para imageamento (Rufus et al., 2008).

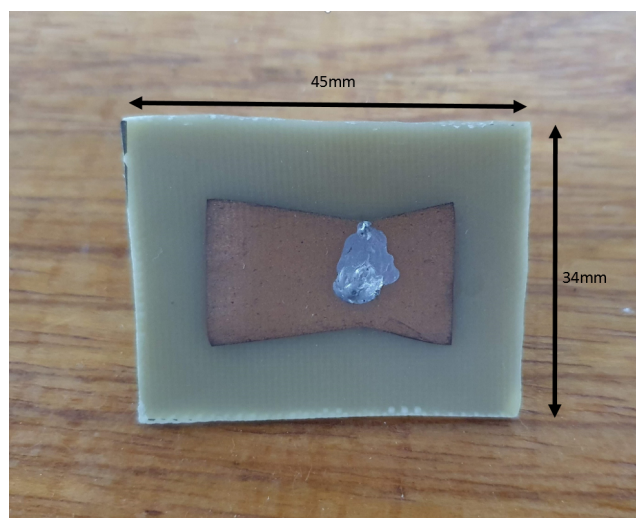


Figura 3. Antena Bow-Tie

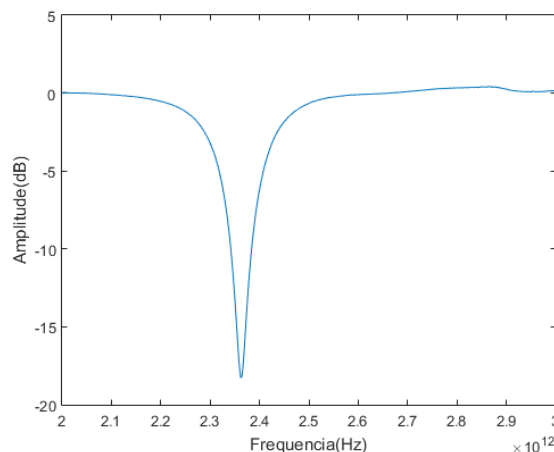


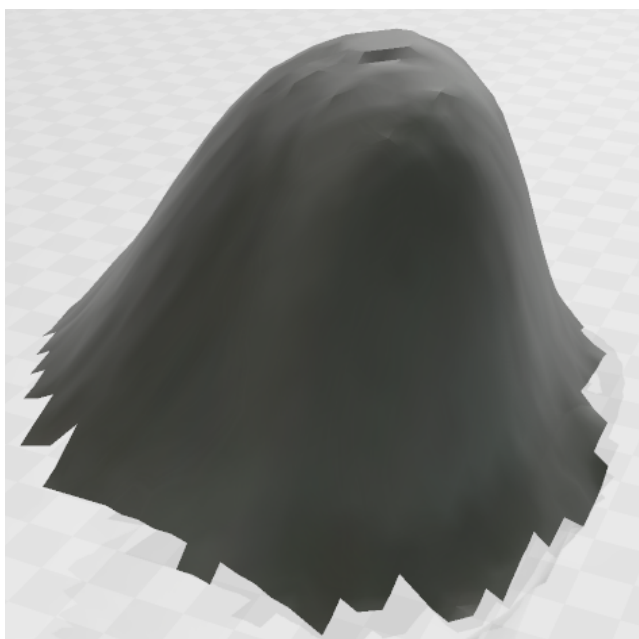
Figura 4. Perda por retorno S11 da antena

3. RESULTADOS

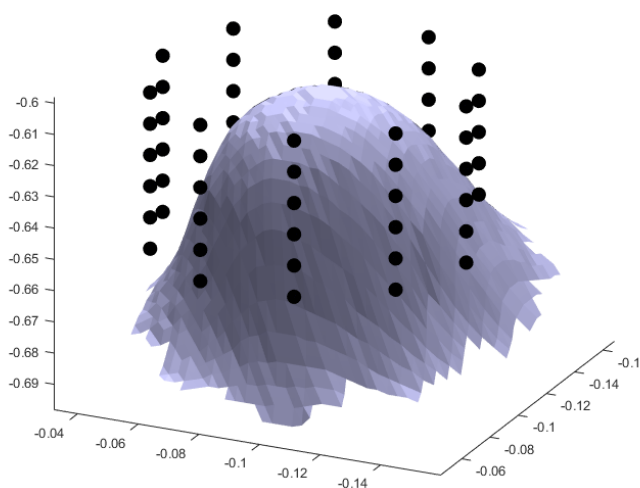
Primeiro foi analisado a capacidade do tomógrafo de obter o formato externo da mama. Foi desenvolvido um software para que o operador selecione a região de de interesse. O operador é responsável determinar os limites laterais e de profundidade da região de interesse. Na imagem 5a observa-se a superfície obtida pela câmera de profundidade

de um dos fantasmas utilizados neste estudo. Observa-se que a câmera de profundidade foi capaz de obter a superfície do fantoma de forma satisfatória.

Foi então analisado a capacidade do software do tomógrafo de determinar automaticamente o posicionamento das antenas a partir da superfície da mama encontrada. Observa-se na imagem 5a a superfície obtida pela câmera de profundidade e na imagem 5b observa-se os pontos referentes as possíveis posições das antenas sobrepostos à superfície do fantoma obtida pela câmera de profundidade. Neste estudo foram utilizados dois fantasmas de tamanhos diferentes para analisar a flexibilidade do sistema em obter o posicionamento das antenas para pacientes com mamas de diferentes tamanhos. Em ambos os casos o software do tomógrafo foi capaz de determinar o posicionamento das antenas.



(a) Superfície do fantoma obtida pela câmera Intel RealSense



(b) Indicação do posicionamento das antenas

Figura 5. Imagens do fantoma

Por fim foi analisada a capacidade do protótipo construído de efetuar o posicionamento das antenas com o auxílio

dos braços robóticos e efetuar a leitura da reflexão e da transmissão das antenas. Foi utilizada a ferramenta MoveIt para o planejamento do movimento dos braços robóticos, evitando a colisão das antenas com o fantoma da mama. Na imagem 6 observa-se uma sequencia de posicionamentos realizados pelo sistema construído. Na imagem 6a as antenas são posicionadas num primeiro par de posições determinado pelo software de controle. Após o posicionamento das antenas, é efetuada a leitura dos parâmetros de espalhamento pelo analisador de redes. Em seguida, o primeiro braço robótico se move para uma segunda posição enquanto o segundo braço permanece na primeira posição (figura 6b) e novamente é efetuada a leitura pelo analisador de redes. Por fim, o primeiro braço robótico permanece na segunda posição e o segundo braço robótico se move para uma segunda posição (figura 6c).

O protótipo construído foi capaz de posicionar as antenas automaticamente, sem a necessidade do operador determinar o posicionamento das antenas. Na imagem 7 é observado o coeficiente de transmissão aferido para duas diferentes posições das antenas. Observa-se a diferença da magnitude do sinal quando as antenas estão posicionadas em posições diferentes.

4. CONCLUSÃO

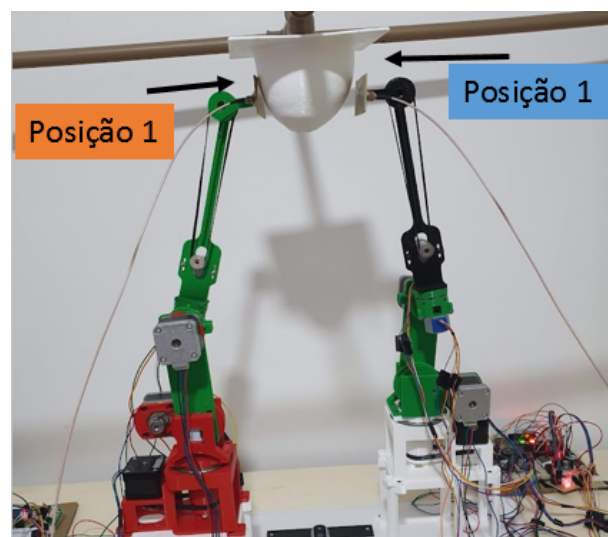
Foi apresentado neste trabalho um novo tipo de tomógrafo para imageamento da mama. O tomógrafo foi capaz de obter a superfície externa do fantoma efetuar posicionamento das antenas. Tal sistema possui a vantagem de ser mais flexível para mamas de tamanhos e formatos diferentes e permitir um numero maior de medições quando comparado a outros sistemas da literatura, além de obter o formato exterior da mama para ser utilizado no software de reconstrução como informação a priori.

Em um futuro trabalho, será apresentado uma evolução do sistema proposto, que utilizará um novo modelo de braço robótico, uma nova antena, e serão utilizados 8 braços robóticos submersos em um meio casador de impedância consistindo de uma mistura de 90% glicerina 10% água para minimizar as reflexões na superfície da mama.

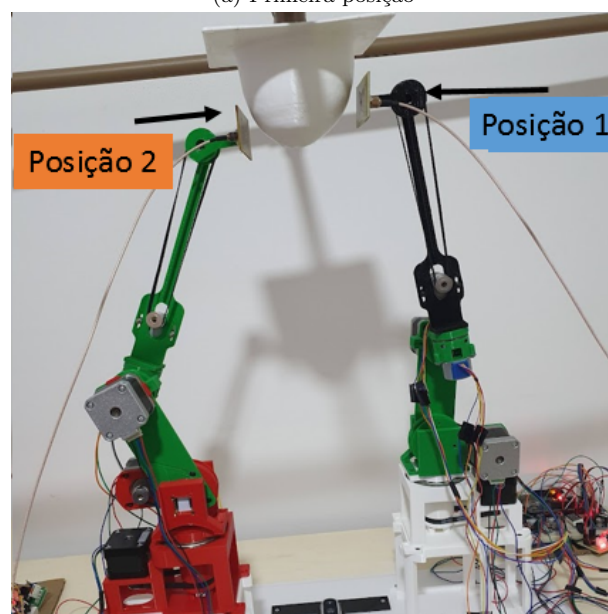
REFERÊNCIAS

- Aldhaeabi, M.A., Alzoubi, K., Almoneef, T.S., Bamatraf, S.M., Attia, H., and Ramahi, O.M. (2020). Review of microwaves techniques for breast cancer detection. *Sensors*, 20(8), 2390.
- Coleman, D., Sukan, I., Chitta, S., and Correll, N. (2014). Reducing the barrier to entry of complex robotic software: a moveit! case study. *arXiv preprint arXiv:1404.3785*.
- Gilmore, C., Mojabi, P., Zakaria, A., Ostadrahimi, M., Kaye, C., Noghianian, S., Shafai, L., Pistorius, S., and LoVetri, J. (2009). A wideband microwave tomography system with a novel frequency selection procedure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57(4), 894–904.
- Grzegorzczuk, T.M., Meaney, P.M., Kaufman, P.A., Paulsen, K.D., et al. (2012). Fast 3-d tomographic microwave imaging for breast cancer detection. *IEEE transactions on medical imaging*, 31(8), 1584–1592.

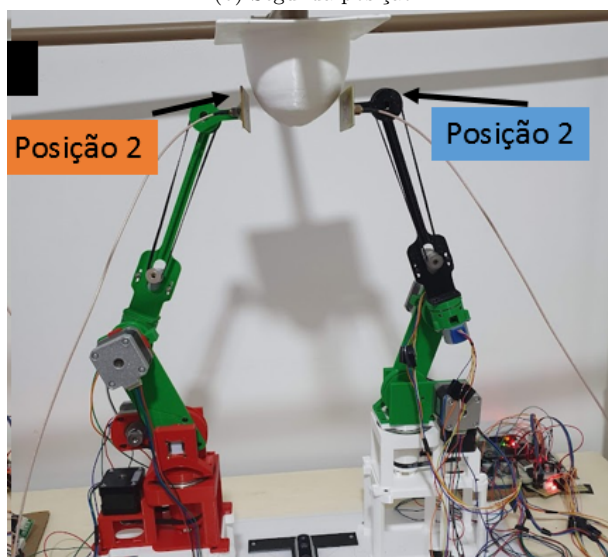
- Klemm, M., Craddock, I., Leendertz, J., Preece, A., and Benjamin, R. (2008). Experimental and clinical results of breast cancer detection using uwb microwave radar. In *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1–4. IEEE.
- Lazebnik, M., Popovic, D., McCartney, L., Watkins, C.B., Lindstrom, M.J., Harter, J., Sewall, S., Ogilvie, T., Magliocco, A., Breslin, T.M., et al. (2007). A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries. *Physics in medicine & biology*, 52(20), 6093.
- Meaney, P., Hartov, A., Raynolds, T., Davis, C., Richter, S., Schoenberger, F., Geimer, S., and Paulsen, K. (2020). Low cost, high performance, 16-channel microwave measurement system for tomographic applications. *Sensors*, 20(18), 5436.
- Meaney, P.M., Shubitidze, F., Fanning, M.W., Kmiec, M., Epstein, N.R., and Paulsen, K.D. (2012). Surface wave multipath signals in near-field microwave imaging. *International Journal of Biomedical Imaging*, 2012.
- Pastorino, M. (2010). *Microwave imaging*. John Wiley & Sons.
- Preece, A.W., Craddock, I., Shere, M., Jones, L., and Winton, H.L. (2016). Maria m4: clinical evaluation of a prototype ultrawideband radar scanner for breast cancer detection. *Journal of Medical Imaging*, 3(3), 033502.
- Reimer, T., Solis-Nepote, M., and Pistorius, S. (2020). The application of an iterative structure to the delay-and-sum and the delay-multiply-and-sum beamformers in breast microwave imaging. *Diagnostics*, 10(6), 411.
- Rufus, E., Alex, Z.C., and Chaitanya, P.V. (2008). A modified bow-tie antenna for microwave imaging applications. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe)*, 7(2), 115–122.
- Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al. (????). Robotic operating system. URL <https://www.ros.org>.
- Tikhonov, A., Goncharsky, A., Stepanov, V., and Yagola, A. (2013). Numerical methods for the solution of ill-posed problems: Springer science & business media.
- Zhurbenko, V., Rubæk, T., Krozer, V., and Meincke, P. (2010). Design and realisation of a microwave three-dimensional imaging system with application to breast-cancer detection. *IET microwaves, antennas & propagation*, 4(12), 2200–2211.



(a) Primeira posição



(b) Segunda posição



(c) Terceira posição

Figura 6. Sequência de leituras feitas pelo tomógrafo

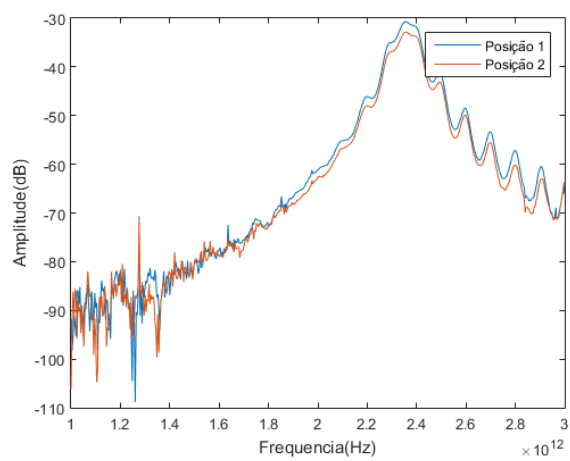


Figura 7. Coeficientes de transmissão medidos pelo VNA para duas posições das antenas