

Figura 6.24. Cortes transversales del experimento 2.

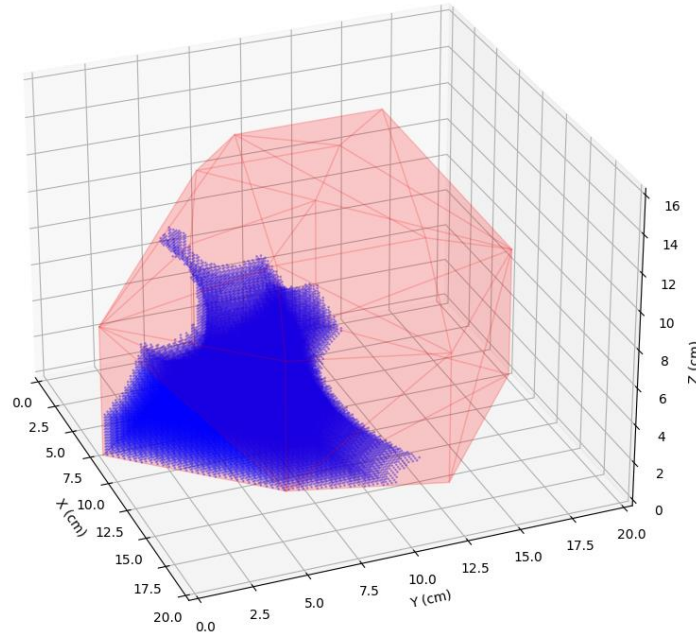


Figura 6.25. Reconstrucción 3D de la zona acotada donde se encuentra el modelo de tumor del experimento 2.

En la figura 6.24, vemos en los dos primeros cortes zonas amplias en blanco que, si bien no corresponden con la ubicación real del objeto, indican un área en la que el modelo podría encontrarse. En la figura 6.25, observamos la reconstrucción 3D de la zona acotada donde se encuentra el modelo de tumor. Notamos que esta zona está mucho menos delimitada en comparación con el experimento anterior.

En esta última sección del capítulo 6, se observó un mayor error en las mediciones. El motivo principal es que utilizamos el modelo *Phantom* para la medida de referencia, y

para eliminar su influencia al comparar las señales obtenidas en los experimentos, el *Phantom* debería haber estado exactamente en la misma posición durante las mediciones y la referencia. Esto no fue posible, ya que tuvimos que retirar manualmente la parte superior del *Phantom* para introducir los modelos de tumor entre experimentos, lo que ocasionó leves desplazamientos en el *Phantom*.

En la reconstrucción 3D de la zona acotada donde se ubica el modelo de tumor del experimento 2, se observa una delimitación muy pobre, similar a la que vimos en la sección dos con los planos sagitales. Esto se debe a una mala distribución de las antenas o, en este caso, a la escasez de antenas. Nuestro sistema no cuenta con antenas en la base; solo tenemos antenas ubicadas a partir de una altura de aproximadamente 8 cm. Por lo tanto, cualquier modelo de tumor situado a esta altura o por encima tendrá una delimitación muy limitada.





7 CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1 CONCLUSIONES

El desarrollo y ejecución de este proyecto han permitido cumplir satisfactoriamente tanto el objetivo principal como los objetivos secundarios planteados. El objetivo principal, que consistía en demostrar la viabilidad de un sistema relativamente económico (ver presupuesto en los anexos) capaz de detectar tumores cerebrales y fenómenos de *brain-shift* utilizando antenas de microondas, fue alcanzado. A través de experimentos con un modelo craneal y un modelo *phantom*, que simula las propiedades eléctricas de los tumores y el cráneo humano, se logró implementar y validar un sistema eficaz en la detección de tumores de diferentes tamaños y ubicaciones, así como en la detección de desplazamientos cerebrales simulados.

En cuanto a los objetivos secundarios, se lograron los siguientes avances importantes:

- Comprobación del principio de funcionamiento de las antenas radar: Las antenas demostraron ser capaces de detectar objetos mediante la emisión y recepción de ondas electromagnéticas, validándose su eficacia en un entorno médico.
- Análisis de las antenas UWB: Se evaluó su idoneidad para la medición precisa de distancias, comprobando que estas antenas son adecuadas para aplicaciones médicas no invasivas.
- Implementación y validación del sistema radar con antenas UWB: Los resultados mostraron que el sistema es capaz de eliminar interferencias externas,

proporcionando datos claros y precisos para la detección de anomalías dentro del cráneo.

- Evaluación en experimentos con diferentes escenarios: Se validó la capacidad del sistema para detectar tumores y desplazamientos cerebrales en diversos escenarios simulados, proporcionando resultados consistentes.
- Desarrollo de un algoritmo de procesamiento y visualización: Este algoritmo permitió la generación de imágenes en 2D y 3D, facilitando la localización clara de las áreas de interés dentro del cráneo.
- Comparación de medidas reales y simuladas: Las mediciones obtenidas por el sistema fueron comparadas con datos reales, mejorando la precisión de las detecciones.
- Precisión del sistema: Se comprobó que el sistema detecta anomalías en el cráneo con una precisión adecuada, mostrando un gran potencial para aplicaciones médicas.

El sistema basado en antenas de microondas demostró ser técnicamente viable, económico y con potencial para la detección no invasiva de tumores cerebrales. La tecnología desarrollada ofrece una solución prometedora para el diagnóstico médico, especialmente en etapas tempranas de la enfermedad.

7.2 RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos, se sugieren las siguientes recomendaciones para optimizar el sistema y su aplicación en futuros proyectos:

- Asegurar una mayor estabilidad en la colocación del modelo *phantom*: Durante los experimentos, se observó que la precisión de las mediciones podría verse comprometida si el *phantom* no se encuentra en la misma posición al tomar las medidas de referencia y las medidas experimentales. Se recomienda utilizar mecanismos que permitan mantener la posición del *phantom* con mayor precisión.
- Incrementar el número de antenas distribuidas de manera más uniforme: Se observó que la cobertura de las antenas era limitada en ciertas áreas del cráneo.

Para mejorar la precisión de las detecciones, sería beneficioso distribuir las antenas de forma más equitativa en todo el entorno del cráneo, incluyendo la base.

- Optimizar el procesamiento de señales: Mejorar los algoritmos que procesan las señales de las antenas podría ayudar a aumentar la claridad y precisión de las imágenes generadas, resultando en una mejor delimitación de los tumores.
- Uso de modelos más complejos: Aunque los experimentos fueron exitosos con el modelo craneal y el *phantom*, sería recomendable utilizar modelos anatómicos más avanzados que incluyan capas adicionales de tejido, como cerebro, piel y músculos, para simular con mayor exactitud las condiciones reales.
- Mejorar el hardware del sistema: Inversiones en el diseño, automatización de la toma de datos y la calidad del hardware de las antenas podrían incrementar la resolución espacial y la precisión de las imágenes, permitiendo una detección de tumores más precisa.

7.3 LÍNEAS FUTURAS

Existen varias líneas futuras que podrían extender el alcance y mejorar los resultados del proyecto, acercando esta tecnología a aplicaciones clínicas reales:

- Aumento de la resolución y precisión: La optimización del hardware de las antenas, así como el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señales más avanzados, permitiría mejorar la resolución espacial de las imágenes y detectar tumores más pequeños con mayor detalle.
- Pruebas con modelos anatómicos más complejos: Incluir tejidos adicionales, como cerebro, piel y músculos, en los modelos de prueba podría ofrecer una mayor aproximación a las condiciones anatómicas reales, ayudando a validar la tecnología en escenarios clínicos más desafiantes.
- Optimización del algoritmo de reconstrucción 3D: Desarrollar algoritmos de reconstrucción tridimensional más rápidos y precisos permitiría una mejor visualización de las áreas de interés y una mayor eficiencia en aplicaciones médicas.
- Integración con otras técnicas de imágenes médicas: Combinar el sistema de antenas de microondas con tecnologías como la resonancia magnética (MRI) o la tomografía computarizada (CT) podría generar un sistema híbrido que

proporcione una imagen más completa del cerebro, mejorando el diagnóstico de enfermedades.

- Pruebas en entornos clínicos: Es esencial que futuros estudios realicen ensayos clínicos con pacientes reales, lo que permitiría evaluar el rendimiento del sistema en condiciones reales y verificar su potencial como herramienta de diagnóstico.

En conclusión, este proyecto ha demostrado el gran potencial de las antenas de microondas para la detección no invasiva de anomalías cerebrales. Con los avances adecuados en resolución, precisión y optimización del sistema, esta tecnología puede llegar a tener aplicaciones médicas significativas, especialmente en la detección temprana de tumores cerebrales y el monitoreo de desplazamientos cerebrales.



8 BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Cancer," 2020. [En línea]. Disponible en: www.who.int/cancer. [Accedido: 18-sep-2024].
- [2] Instituto Nacional de Cáncer, "Statistics on Brain Cancer," 2020. [En línea]. Disponible en: www.cancer.gov. [Accedido: 18-sep-2024].
- [3] Johns Hopkins Medicine, "Brain Tumor Symptoms," 2020. [En línea]. Disponible en: www.hopkinsmedicine.org. [Accedido: 18-sep-2024].
- [4] American Cancer Society, "Brain and Spinal Cord Tumors in Adults," 2020. [En línea]. Disponible en: www.cancer.org. [Accedido: 18-sep-2024].
- [5] Mayo Clinic, "Brain tumor - Diagnosis and treatment," 2020. [En línea]. Disponible en: www.mayoclinic.org. [Accedido: 18-sep-2024].
- [6] Radiological Society of North America, "Radiation exposure in X-ray and CT exams," 2019.
- [7] P. McCracken et al., "Intraoperative Magnetic Resonance Imaging in Neurosurgery: Update on the Current State of the Art," *World Neurosurgery*, vol. 129, pp. 67-78, 2019.
- [8] Técnicos en Radiología, "Efectos adversos de la resonancia magnética," 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.tecnicosradiologia.com/2014/02/efectos-adversos-de-la-resonancia.html>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [9] J. Málaga-Zenteno et al., "Linfoma primario del sistema nervioso central en un paciente inmunocompetente," *SciELO*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.scielo.org>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [10] K. Kelly et al., "MRI-Guided Brain Tumor Resection: Results from 200 Patients," *Journal of Neurosurgery*, vol. 92, no. 3, pp. 491-497, 2018.
- [11] ActiveBeat, "Los 10 tumores cerebrales más comunes," 2021. [En línea]. Disponible en: <https://activebeat.com/esp/cancer-esp/los-10-tumores-cerebrales-mas-comunes/6/>. [Accedido: 18-sep-2024].

- [12] Slideshare, "Principios de TAC," 2016. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/principios-de-tac-recopilacin/57418803>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [13] KSUMSC, "Nuclear oncology," 2019. [En línea]. Disponible en: https://ksumsc.com/download_center/Archive/3rd/434/Teams/2nd%20Semester/Radiology%20Team/3-Nuclear-Oncology.pdf. [Accedido: 18-sep-2024].
- [14] P. Jones et al., "Challenges and Opportunities in the Application of Microwave Imaging for Brain Tumor Detection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 5, pp. 2042-2053, 2019.
- [15] L. M. de Silva et al., "Microwave Tomography for Brain Imaging: Techniques and Applications," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 25, no. 8, pp. 080901, 2020.
- [16] Medimaging.es, "Tomografía de microondas para determinar pronóstico del cáncer de mama," 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.medimaging.es/imaginologia-general/articulos/294747982/tomografia-de-microondas-para-determinar-pronostico-del-cancer-de-mama.html>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [17] R. L. Wong et al., "Characterization of Tumor Tissue Using Microwave Technology," *International Journal of Cancer Research and Treatment*, vol. 10, no. 3, pp. 340-350, 2019.
- [18] K. J. Coyle and S. M. O'Neill, "Intraoperative Microwave Imaging for Brain Tumor Detection," *Neurosurgical Review*, vol. 45, no. 2, pp. 221-233, 2022.
- [19] J. Becker et al., "Portable Microwave Devices for Tumor Detection: Current Developments," *Medical Physics*, vol. 48, no. 1, pp. 112-125, 2021.
- [20] Prezi, "Espectro radioeléctrico y espectro electromagnético," 2022. [En línea]. Disponible en: <https://prezi.com/i/j5lcrnyhbiqf/espectro-radioelectrico-y-espectro-electromagnetico/>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [21] C. Chong and F. Watanabe, "Ultra-Wideband Communications: Fundamentals and Applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 45-50, 2018.
- [22] R. Taylor and T. Dissanayake, "Design and Analysis of Low Power UWB Antennas," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 31, no. 15, pp. 2003-2015, 2017.
- [23] E. G. San Román Castillo et al., *Aplicaciones y teoría de ingeniería de microondas*, 1ra ed., mar. 2014.

- [24] J. J. Murillo Fuentes, *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación*, 2da ed. Madrid, España: Ediciones Paraninfo, 2019.
- [25] Alomainy et al., "UWB Antennas for Wireless Communication Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 12, pp. 3451-3458, 2015.
- [26] A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed., Wiley, 2016.
- [27] J. A. López-Salcedo, *Sistemas radar*, Universitat Oberta de Catalunya, 2020.
- [28] J. L. Monroy Amado et al., "Caracterización de amplificadores de microondas: de los Parámetros-S a los Parámetros-X," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 10, pp. 3557–3568, Oct. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://corpus.com/id/172067490>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [29] Keysight Technologies, "Keysight ZV-Z135 Calibration Kit," 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.keysight.com>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [30] Siglent Technologies, "VNA Mechanical Calibration Kits," [En línea]. Disponible en: <https://www.siglent.eu/accessories/vna-mechanical-calibration-kits>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [31] Serial Cable, "N-Type Female to BNC Male RF Pigtail Cable," [En línea]. Disponible en: <https://www.serial-cable.com/rf-coaxial-cable/bnc-cable/n-type-female-to-bnc-male-rf-pigtail-cable.html>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [32] Komunica Power, "Conectores y Adaptadores RF," [En línea]. Disponible en: <https://komunicapower.com/es/253-conectores-y-adaptadores-rf>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [33] Joslin Peru, "Conector coaxial hembra SMA," [En línea]. Disponible en: <https://joslinperu.com/producto/conector-coaxial-hembra-sma/>. [Accedido: 18-sep-2024].
- [34] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [35] R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2017.
- [36] A. Ko and J. M. Schenkel, "A Comparison of Radar Imaging Techniques for Medical Applications," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 29, no. 8, pp. 1432-1440, Aug. 2010.
- [37] P. L. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2014.

- [38] J. H. K. Lee and A. D. Alford, "3D Imaging Using Multiple Radar Sensors: Methodologies and Applications," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 4, pp. 1780-1792, Oct. 2019.
- [39] L. Kayal. (2019). "Diseño, optimización y fabricación de antenas de banda ancha tipo Vivaldi" (Trabajo Fin de Grado). Universidad Miguel Hernández de Elche.
- [40] M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., Wiley, 2011.
- [41] R. Mallahzadeh et al., "Design of an ultrawideband Vivaldi antenna for use in a microwave imaging system," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 4, no. 5, pp. 709-717, May 2010.
- [42] "Diseño e implementación de sistemas de medida no invasivos basados en microondas para aplicaciones médicas: detección del desplazamiento cerebral, detección de aneurismas de aorta abdominal y evaluación de las suturas anastomosis intestinal", Julio 2024
- [43] R. Weily et al., "A planar printed antenna capable of near field phase control," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 1, pp. 34-41, Jan. 2005.
- [44] K. Bhattacharyya, *Phased Array Antennas: Floquet Analysis*, Wiley, 2006.
- [45] P. S. Hall and S. J. Vetterlein, "Review of radio frequency beamforming techniques," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 4, pp. 595-601, Apr. 1995.
- [46] H. J. Ensle, "Microwave Network Analysis," in *Handbook of Microwave and Optical Components*, vol. 1, K. Chang, Ed., Wiley, 1989, pp. 251-279.
- [47] Rohde & Schwarz, *ZV-Z135 Calibration Kit Manual*, 2020.

9 ANEXOS





9.1.1 ANEXO I: PRESUPUESTO





En este anexo se adjunta los precios unitarios y totales del material que ha sido utilizado para armar el sistema, los precios son orientativos para obtener un aproximado del precio total.

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total (Sin I.V.A.)
Sustrato FR4	12	5,00 €	60,00 €
VNA	1	13.280,00 €	13.280,00 €
Conectores RF	12	6,71 €	80,52 €
Adaptadores RF	12	5,74 €	68,88 €
Cables RF	14	19,95 €	279,30 €
Kit calibración	1	2.125,00 €	2.125,00 €
USB	1	5,00 €	5,00 €
Soporte madera	1	5,00 €	5,00 €
Ordenador ASUS	1	599,00 €	599,00 €
			16.502,70 €



9.1.2 ANEXO II: EXTRACTO DEL CÓDIGO 1 UTILIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE LA SEÑAL DISTANCIA (SD)





En este anexo se adjunta partes del primero código desarrollado en Python.

Para la lectura de archivos que contienen los parámetros s:

```
for k in range(nfiles):  
    aux = rf.Network(  
        r"C:/leo/Practicas/antenas_160721/exp1_2" + r"/c_" + r"%d.s2p" % (k + 1)  
    )  
    craneo_aux[k, :] = aux.s[:, 0, 0]  
    craneo_aux[k + nfiles, :] = aux.s[:, 1, 1]  
    aux = rf.Network(  
        r"C:/leo/Practicas/antenas_160721/exp1_2" + r"/r_" + r"%d.s2p" % (k + 1)  
    )  
    ref_aux[k, :] = aux.s[:, 0, 0]  
    ref_aux[k + nfiles, :] = aux.s[:, 1, 1]  
    freq = aux.f
```

Función que ejecuta la transformada inversa de Fourier y ajusta los ejes temporales:

```
def transformada(freq, S22_ante, num):

    Fmax = max(freq) * 100

    f_new = np.arange(min(freq), Fmax, (freq[2] - freq[1]))

    r_t = (len(f_new) - 1) / (max(f_new) - min(f_new))

    ss = r_t / (len(f_new) - 1)

    time = np.linspace(0, (len(f_new) - 1) / 2 * ss, len(f_new))

    s22_new = np.zeros((num, len(f_new)), dtype=complex)

    for i in range(num):

        s22_new[i, 0 : len(S22_ante[1, :])] = S22_ante[i, :]

        s22_new[

            i, (len(s22_new[1, :]) - len(S22_ante[1, :])) : len(s22_new[1, :])

        ] = np.flip(S22_ante[i, :]).conjugate()

        s22_new[

            i, (len(S22_ante[1, :])) : (len(s22_new[1, :]) - len(S22_ante[1, :]))

        ] = S22_ante[i, len(S22_ante[i, :]) - 1]

    s22_new = ifft(s22_new)

    return time, s22_new
```

9.1.3 ANEXO III: EXTRACTOS DEL CODIGO 2 UTILIZADO PARA LA GENERACIÓN DE IMAGEN MÉDICA Y RECONSTRUCCIÓN 3D





En este anexo se adjunta partes del segundo código desarrollado en Python.

Función que crea las esferas y el poliedro delimitado por la ubicación de las antenas en una sola figura 3D:

```
def graficar_centros_prisma_3d_y_poliedro(dimensiones_prisma,
centros_esferas):

    fig = plt.figure(figsize=(15, 10))

    ax = fig.add_subplot(111, projection="3d")

    # Graficar el prisma rectangular

    x = [0, dimensiones_prisma[0], dimensiones_prisma[0], 0, 0]
    y = [0, 0, dimensiones_prisma[1], dimensiones_prisma[1], 0]
    z = [0, 0, 0, 0, 0]
    ax.plot(x, y, z, color="b", alpha=0.5)
    ax.plot(x, y, [dimensiones_prisma[2]] * 5, color="b", alpha=0.5)

    for i in range(4):

        ax.plot(

            [x[i], x[i]], [y[i], y[i]], [0, dimensiones_prisma[2]], color="b", alpha=0.5

        )

    # Graficar los centros de las esferas y sus proyecciones

    centros = np.array(centros_esferas)

    centros_proyectados = np.column_stack(

        (centros[:, 0], centros[:, 1], np.zeros(len(centros)))

    )
```

```
todos_los_puntos = np.vstack((centros, centros_proyectados))

ax.scatter(centros[:, 0], centros[:, 1], centros[:, 2], color="r", s=50)

ax.scatter(
    centros_proyectados[:, 0],
    centros_proyectados[:, 1],
    centros_proyectados[:, 2],
    color="g",
    s=30,
    alpha=0.5,
)

for centro, proyeccion in zip(centros, centros_proyectados):
    ax.plot(
        [centro[0], proyeccion[0]],
        [centro[1], proyeccion[1]],
        [centro[2], proyeccion[2]],
        "g--",
        alpha=0.5,
    )

# Crear y graficar el poliedro extendido
casco = ConvexHull(todos_los_puntos)

for simplex in casco.simplices:
```

```
caras = Poly3DCollection([todos_los_puntos[simplex]])  
  
caras.set_alpha(0.2)  
  
caras.set_color("c")  
  
ax.add_collection3d(caras)  
  
  
ax.set_xlabel("X (cm)")  
ax.set_ylabel("Y (cm)")  
ax.set_zlabel("Z (cm)")  
ax.set_title("Vista 3D del Prisma, Centros de Esferas y Poliedro Extendido")  
  
  
plt.show()  
  
return casco, todos_los_puntos
```

