



DISEÑO DE UNA ANTENA-SENSOR DE DEFORMACIÓN FLEXIBLE Y PORTABLE

DESING OF A FLEXIBLE AND PORTABLE DEFORMATION SENSOR-ANTENA

Katherine Alexandra Montero Cardona
katherine.monteroc@comunidad.iush.edu.co
No. ORCID (0009-0009-4912-3662)
Colombia

Katherine Alexandra Montero, estudiante de Ingeniería Electrónica, INGENIUSH

Johann Rene Delgado Gamboa
johann.delgadog@comunidad.iush.edu.co
No. ORCID (0009-0009-7184-524X)
Colombia

Johann Rene Delgado Gamboa, Estudiante de Ingeniería Electrónica, INGENIUSH

Julián Arango Toro
julian.arango@salazaryherrera.edu.co
Institución Universitaria Salazar y Herrera
No. ORCID (0000-0003-2093-8955)
Colombia

Julian Arango Toro, Magister en automatización y control industrial, Instituto Tecnológico Metropolitano, Ingeniero Biomédico, INGENIUSH

Recepción: 22/03/2024
Aceptación: 01/07/2025

DOI: <https://doi.org/10.15765/ss3z6182>

Resumen

En la actualidad se gastan millones de dólares anuales en reconstrucciones del LCA (ligamento cruzado anterior) (cálculo hecho sobre 50.000 reconstrucciones a 17.000 dólares cada una). El fútbol, el béisbol, el baloncesto y el esquí originan el 78% de las lesiones del LCA en deportistas. Cada año ocurren en Estados Unidos por lo menos 100.000 casos de lesiones del ligamento cruzado anterior (LCA) en deportistas jóvenes (típicamente entre los 15-25 años, pero con mayor riesgo entre los 10 y 19), las cuales originan problemas importantes tanto físicos como psicológicos y económicos. Actualmente, se han venido implementando diversas técnicas, métodos o metodologías para censar de manera mínimamente invasiva en el ligamento cruzado anterior en donde se han implementado sistemas basados en redes de sensores inalámbricas para la detección de rotación y movimiento



en tres ejes enfocado a la evaluación objetiva de una terapia de rehabilitación física de rodilla. Estos sensores no han sido validados experimentalmente, por ende, no se puede analizar su respuesta experimental. Para alcanzar el objetivo de esta investigación, se usa el método PHVA (planear, hacer, verificar y actuar) que inicia con la selección y caracterización electromagnética y mecánica del textil. Luego se hace la simulación en software CST Suite para luego fabricar la antena empleando corte manual y adhesión por temperatura. Luego se empleó el analizador de redes vectorial para medir la respuesta de la antena en el espacio libre cuya respuesta fue de 2.55 GHz. Finalmente, se procederá a realizar mediciones en deportistas para evaluar la usabilidad del sensor.

Palabras clave

Antena Parche, dieléctrico, deformación, sensor, flexible.

Abstract

Currently, millions of dollars are spent annually on anterior cruciate ligament (ACL) reconstructions (based on 50,000 reconstructions at \$17,000 each). Soccer, baseball, basketball, and skiing account for 78% of ACL injuries in athletes. Each year, there are at least 100,000 cases of anterior cruciate ligament (ACL) injuries in young athletes (typically between the ages of 15-25, but with a higher risk between 10 and 19) in the United States, which cause significant physical, psychological, and economic problems. Recently, various techniques, methods, or methodologies have been implemented to sense the anterior cruciate ligament in a minimally invasive manner, including systems based on wireless sensor networks for the detection of rotation and three-axis movement focused on the objective evaluation of a knee physical rehabilitation therapy. These sensors have not been experimentally validated; therefore, their experimental response cannot be analyzed. To achieve the objective of this research, the PDCA (Plan, Do, Check, Act) method is used, starting with the selection and electromagnetic and mechanical characterization of the textile. Then, simulation is performed in CST Suite software, followed by antenna manufacturing using manual cutting and temperature adhesion. Subsequently, a vector network analyzer is used to measure the antenna's response in free space, which was 2.55 GHz. Finally, measurements will be carried out on athletes to evaluate the sensor's usability.

Keywords

Antenna Patch, Dielectric, Warp, Sensor, Flexible.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, se han venido implementando diversas técnicas, métodos o metodologías para sensar de manera mínimamente invasiva en el ligamento cruzado anterior. Baldazzi et al., (2022). Desarrollaron un sistema con Internet de las cosas (IoT) para el monitoreo de posicionamiento angular como apoyo en procesos en rehabilitación de rodilla.

Amundsen et al., (2022) crearon un modelo biomecánico para mejorar la predicción específica de las caídas en el ciclo de marcha. Por otro lado, Maskeliūnas et al., (2023) diseñó un sistema basado en redes de sensores inalámbricos para la detección de rotación y movimiento en tres ejes enfocado a la evaluación objetiva de una terapia de rehabilitación física de rodilla. Wu et al., (2023) presentan una antena vestible



para detectar caídas en personas mayores. Utiliza una meta superficie impresa en fieltro flexible y una antena de ranura en la banda C del área corporal. Los resultados resaltan su potencial para detección de caídas en personas mayores, ofreciendo banda ancha, polarización circular y mayor sensibilidad.

La problemática identificada es que estos sensores-antena en su mayoría no han sido implementados y validados por ende, no se puede analizar su respuesta experimental, además los estudios no presentan una validación e un grupo de pacientes en donde se permita determinar la confiabilidad y precios del sensor. (Memon et al., 2021; Noordam et al., 2019). El trabajo propuesto busca diseñar y fabricar una antena tipo parche con materiales flexibles para usarla como sensor de deformación para medir indirectamente la elongación del ligamento cruzado anterior (LCA). El enfoque consistirá en combinar herramientas avanzadas de diseño de antenas con análisis mecánicos para crear un dispositivo portátil que funcione eficientemente como un sensor de deformación. El proceso incluye simulación por computadora para predecir el comportamiento de las estructuras diseñadas y ajustar los parámetros eléctricos necesarios para detectar con precisión los movimientos en la rodilla. Estas simulaciones servirán como base para ajustar la metodología de fabricación del sensor y garantizar que los resultados prácticos se alineen con los objetivos teóricos establecidos. Una vez fabricado y ajustado el sensor-antena, se llevarán a cabo pruebas en deportistas para evaluar su desempeño y validar su eficacia como detector de deformaciones.

El desarrollo de este trabajo está organizado de la siguiente manera: sección 2 materiales y métodos en donde explica todo el desarrollo del sensor. En la sección 3 resultados, se ilustran para cada fase de la metodología, los procedimientos de diseño, construcción, calibración y depuración de la antena para ser usada como sensor de deformación; luego se valida la eficacia, confiabilidad y usabilidad de esta como sensor de deformación con tres deportistas. En el capítulo de conclusiones, se exponen los principales hallazgos por cada objetivo y se dan ideas clave para que se exploren en trabajos futuros.

MÉTODOS

Una vez finalizada la etapa de investigación sobre materiales dieléctricos textiles, se seleccionaron el ShieldIT y la tela café. A estos materiales se les realizó la caracterización mecánica con una máquina de ensayos universal del ITM y la caracterización electromagnética con una jaula de Faraday artesanal. En esta etapa se hizo la gestión de pedir las muestras gratis a las fábricas internacionales tanto de los textiles como de los conectores AMP SMA. Una vez se seleccionan los materiales dieléctricos y conductores, se crean e ingresan los datos de la permitividad relativa, las pérdidas tangenciales y el espesor de los materiales al software CST Studio Suite para realizar las simulaciones. Tras las simulaciones se analizan los resultados del parámetro S1,1 y la carta Smith, verificando perdidas por retorno e impedancia, si al realizar la simulación la respuesta no coincide se ajustan los parámetros hasta encontrar las respuestas deseadas de 2,45 GHz, impedancia de 50 ohmios y pérdidas por retorno -10 dB. En esta etapa se utilizaron los siguientes materiales: textil ShieldIT, textil café, pie de rey, tijeras para corte de tela, conectores AMP SMA, y la fabricación se hizo con corte manual. A través de un analizador de señal, se verificó que la antena resonara en los parámetros esperados 2,45 GHz, impedancia de 50 ohmios y pérdidas por retorno -10Db, se compara con los resultados de la simulación en CST Studio Suite. Luego de tener la antena fabricada, se procederá a realizar validaciones experimentales en pacientes, con la finalidad de comparar los resultados con el test jump y así poder predecir lesiones de ligamento cruzado anterior en deportistas de clubes de fútbol de Antioquia.



RESULTADOS

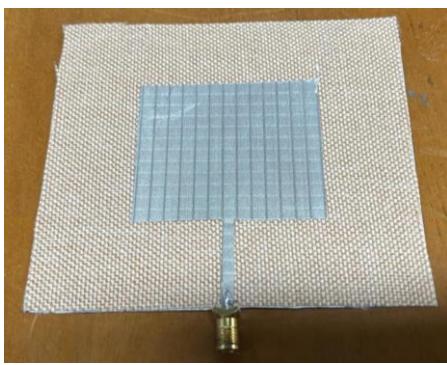
Una vez realizada la investigación y estudio de los diferentes materiales textiles, se seleccionó la tela café y el ShieldIT porque se identificó que el material conductor era de fácil adhesión en la tela café. Además, permite hacer la soldadura del conector estable, evitando que él desprenda. El conector seleccionado es el AMP SMA. La técnica para la elaboración es manual.

En la Tabla 2 se relacionan las medidas de la antena establecidas en la simulación:

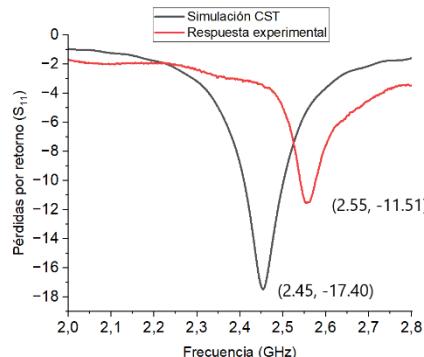
Tabla 2. Medidas de la antena experimental – ShieldIT y Tela café

Descripción	Dieléctrico	Conductor
Largo del inset (mm)	0	0
Espesor (mm)	0.61	0.18
Ancho línea de transmisión (mm)		2.65
Largo (mm)	88	42.8
Ancho (mm)	101	50.50

En la Figura 1 se muestra la antena tipo parche fabricada en los materiales ShieldIT y tela café y en la figura 2 se muestra una comparación de resultados entre la simulación y los resultados adquiridos a través del analizador de señales de la antena fabricada, en la tabla 3 se resumen los márgenes de error entre la simulación y la antena fabricada. Para la frecuencia se obtuvo un error del 0.1 y en las pérdidas de retorno de 5.89. Estos resultados se ven afectados a que en la fabricación manual llegar a la precisión en los cortes y adhesión del conductor no es tan fácil, ya que son medidas milimétricas. La baja estanqueidad de los materiales textiles hace que la tela cambie sus propiedades iniciales.



*Figura 1
Antena tipo parche – Shieldit super y Tela café
Imagen: propia*



*Figura 2
Gráfica resultados simulación vs experimental
Imagen: propia*



DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

1. Con la fabricación manual es posible elaborar una antena que entrega datos aproximados a los de la simulación. Sin embargo, al ser medidas milimétricas, hay márgenes de error asociados a la dificultad de fabricar manualmente y al ojo humano medidas tan exactas.
2. Los textiles presentan alta estanqueidad que se refiere a una propiedad que se basa en la capacidad de un material para que entren partículas externas al interior del textil, ya sea agua, aire, polvo, etc. Esto hace que el textil pierda sus propiedades iniciales y la permitividad relativa cambie.
3. Al hacer la soldadura del conector en la línea de transmisión del textil conductor, también hay pérdidas por la delgada de la línea de transmisión y, al ser una actividad hecha manualmente, alcanzar la exactitud se vuelve complejo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amundsen, T., Rossman, M., Ahmad, I., Clark, A., & Huber, M. (2022). Fall risk assessment and visualization through gait analysis. *Smart Health*, 25(May 2013), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2022.100284>
- Baldazzi, A., Molinaro, L., Taborri, J., Margheritini, F., Rossi, S., & Bergamini, E. (2022). Reliability of wearable sensors-based parameters for the assessment of knee stability. *PLoS ONE*, 17(9 September), 1–18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274817>
- Maskeliūnas, R., Damaševičius, R., Blažauskas, T., Canbulut, C., Adomavičienė, A., & Griškevičius, J. (2023). BiomacVR: A Virtual Reality-Based System for Precise Human Posture and Motion Analysis in Rehabilitation Exercises Using Depth Sensors. *Electronics (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/electronics12020339>
- Memon, A. W., de Paula, I. L., Malengier, B., Vasile, S., Van Torre, P., & Van Langenhove, L. (2021). Breathable textile rectangular ring microstrip patch antenna at 2.45 ghz for wearable applications. *Sensors*, 21(5), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s21051635>
- Noordam, R., Bos, M. M., Wang, H., Winkler, T. W., Bentley, A. R., Kilpeläinen, T. O., de Vries, P. S., Sung, Y. J., Schwander, K., Cade, B. E., Manning, A., Aschard, H., Brown, M. R., Chen, H., Franceschini, N., Musani, S. K., Richard, M., Vojinovic, D., Aslibekyan, S., ... Redline, S. (2019). Multi-ancestry sleep-by-SNP interaction analysis in 126,926 individuals reveals lipid loci stratified by sleep duration. *Nature Communications*, 10(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12958-0>
- Wu, R., Dong, J., Wang, M., & Abdulkarim, Y. I. (2023). Wearable antenna sensor based on bandwidth-enhanced metasurface for elderly fall assistance detection. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 223(November). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113753>