

# Cyber-Tooth

Realizzazione del reader

**Team B:**

A. Grieco, L. Grillo, F. Lestini, S. Rossi, E. Simonelli

25 Giugno 2021

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Analisi dello stato dell'arte</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Scelta dei materiali</b>	<b>7</b>
3.1	Substrato . . . . .	7
3.2	Strato adesivo . . . . .	7
3.3	Conduttori . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Scelta antenna per interrogazione</b>	<b>8</b>
4.1	Geometria . . . . .	8
4.2	Patch . . . . .	9
4.2.1	Patch 5x5 . . . . .	10
4.2.2	Patch 3x3 . . . . .	15
4.2.3	Patch 4x2.5 . . . . .	18
4.3	Loop . . . . .	20
4.3.1	Loop 5x5 . . . . .	20
4.3.2	Loop 3x3 . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Ottimizzazione e Sviluppo</b>	<b>24</b>
5.1	Realizzazione dei prototipi . . . . .	24
5.2	Misurazioni . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Conclusione</b>	<b>31</b>

# 1 Introduzione

Negli ultimi anni sono state compiute ricerche significative per la realizzazione di dispositivi elettronici indossabili in virtù della loro applicabilità che va dal monitoraggio sanitario alla sicurezza. In particolare, sono state studiate le problematiche legate al campo odontoiatrico relative all'incremento della temperatura gengivale. Le utilità della misurazione della temperatura nella cavità orale sono molteplici: per esempio, evidenziare uno stato febbrale oppure riscontrare una buona riuscita di un impianto dentale, ma anche mucosite, gengivite, patologie delle ghiandole salivari, mancata osteointegrazione (dopo l'inserimento dell'impianto con la successiva perdita e rimozione dello stesso). L'obiettivo finale di questa ricerca, quindi, verte sulla realizzazione di un'antenna epidermica che, attraverso una comunicazione through the body con un tag integrato all'interno dell'impianto dentale, sia in grado di monitorare la temperatura gengivale. In particolare, i membri del team B si sono occupati della realizzazione del reader che sarà posizionato sulla guancia ed alimentato via cavo. [13]

Il team è composto da cinque membri, ad ognuno dei quali è stato assegnato un "work package" da dover supervisionare:

- **Francesco Lestini:** Project Manager
- **Addolorata Grieco:** Work Package Leader Materials
- **Sergio Rossi:** Work Package Leader Antenna Design
- **Elisa Simonelli:** Work Package Leader Simulation
- **Lorenzo Grillo:** Work Package Leader Optimization and Development

Il lavoro è stato continuo e condiviso da tutti i membri del team. Le attività sono state suddivise equamente a seguito di un confronto. Inoltre, è stato realizzato un diagramma di GANTT (riportato in *Figura 1*), al fine di temporizzare e suddividere in più step l'intero progetto.

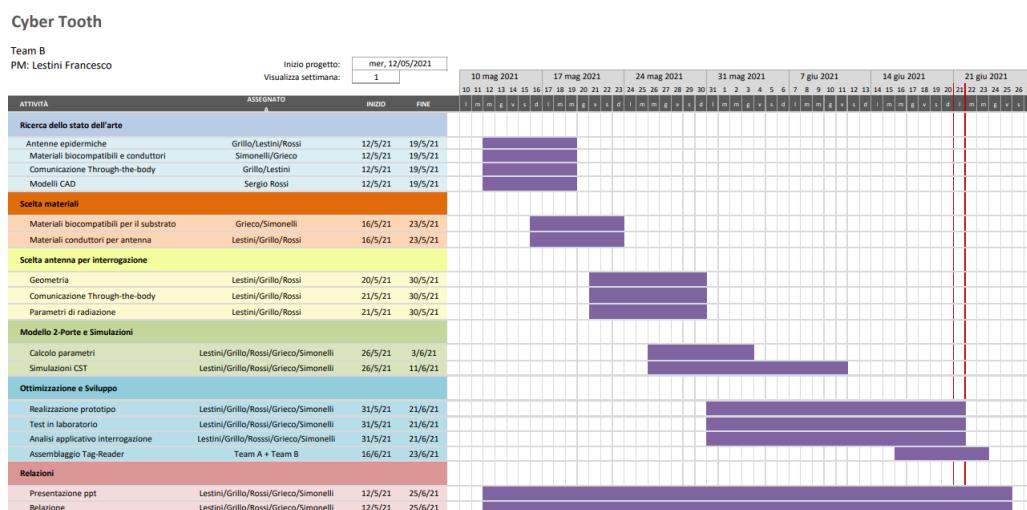


Figura 1: Diagramma di GANTT

## 2 Analisi dello stato dell'arte

Ciascun membro ha condotto delle ricerche che poi sono state condivise con tutto il team. In particolare, le ricerche sono state effettuate analizzando vari articoli scientifici riguardanti antenne epidermiche. E' stata riservata maggiore attenzione alla ricerca dei materiali dielettrici e conduttori; infine, è stata effettuata una ricerca per la comunicazione through-the-body. Gli articoli analizzati sono stati:

- *Performance Comparison of Patch and Loop Antennas for the Wireless Power Transfer and Transcutaneous Telemetry in the 860-960 MHz Frequency Band* (C. Miozzi, G. Saggio, E. Gruppioni, G. Marrocco): confronta le prestazioni della loop antenna e della slotted-patch antenna all'interno di un sistema di telemetria attraverso il corpo, senza batteria, basato sulla modulazione a retrodiffusione nella banda UHF. [13]
- *Aluminum-doped zinc oxide thin films deposited by electrospray method* (Georgi Marinova, b, Konstantin Lovchinova, Violeta Madjarovaa, Velichka Strijkovaa, Marina Vasilevaa, Nikola Malinowskia, Tsvetanka Babeva): si dimostra l'applicabilità dei film sottili studiati come elettrodi conduttori trasparenti [12].
- *A wearable flexible multi-band antenna based on a square slotted printed monopole* (L. Ma, R. M. Edwards, S. Bashir, M. I. Khattak): presenta un'antenna wearable multi-banda stampata su un substrato di neoprene [11].
- *Dielectric Proprieties Determination of High Density Polyethylene (HDPE) by Dielectric Spectroscopy* (T. Seghier, F. Benabed): presenta e analizza le proprietà dielettriche del polietilene ad alta densità (HDPE) mediante spettroscopia, vengono anche presentati permittività, fattore di perdita e dati di conducibilità nella gamma di frequenza da 10-2 Hz a 1 MHz su gamma di temperature da -60 °C a 60 °C [25].
- *Feasibility Study of PDMS Embedded Transparent Conductive Fabric for the Realization of Transparent Flexible Antennas* (Abu Sadat Md. Sayem, Roy B. V. B. Simorangkir, Karu P. Esselle, Raheel M. Hashmi): studia l'idoneità e l'efficacia del tessuto conduttivo trasparente per la progettazione e la realizzazione di antenne trasparenti indossabili [20].
- *A high transparent and ultra-streichable conductor with stable conductivity during large deformation* (Zhouyue Lei, Peiyi Wu): illustra un effetto sinergico tra nanocanali conduttori zwitterionici e dynamic hydrogen-bonding network per superare le limitazioni dovute a deformazioni [30].
- *Assessment of PDMS Technology in a MIMO Antenna Array* (Abdulrahman Shueai Mohsen Alqadami, Mohd Faizal Jamlos, Ping Jack Soh, Guy A. E. Vandebosch): valuta l'uso di un substrato flessibile multistrato in polidimetilsilossano (PDMS) in un array di antenne MIMO per applicazioni WLAN a 5,8 GHz [1].
- *Design and Characterization of Meshed Microstrip Transmission Lines* (Zachary J. Silva, Christopher R. Valenta, Gregory D. Durgin): presenta l'analisi teorica verificata con risultati simulati e misure di laboratorio di una linea di trasmissione a micro-maglie a 2,4 GHz su un piano di terra solido [22].
- *Design of Wearable Textile Antenna with Various Substrate and Investigation on Fabric Selection* (Pranita Manish Potey, Kushal Tuckley): presenta le proprietà, le prestazioni e la realizzazione di un'antenna tessile indossabile. [15]
- *Dielectric constants of pdms nanocomposites using conducting polymer nanowires* (Ping Du, Xi Lin, Xin Zhang): presenta un approccio pratico ed efficiente per migliorare le proprietà elettriche del PDMS utilizzando nanofili di polimeri conduttori (CPNWs) [4].
- *Dual-Wideband Patch-Slot Loop Textile Antenna for WBAN/WiFi/LTE Applications* (Hung-Wei Lo, Eric S. Li, Yu -You Lin, Roger Lu, Kuo -Sheng Chin): presenta un'antenna tessile con prestazioni dual-wide band per le comunicazioni wireless indossabili [10].
- *Engineered elastomeric bio-nanocomposites from linseed oil/organoclay tailored for vibration damping* (Rakesh Das, Rajesh Kumar, Sovan Lal Banerjee, P. P. Kundu): si occupa della preparazione e della caratterizzazione di nanocompositi elastomerici da risorse rinnovabili (argilla) per applicazioni di smorzamento delle vibrazioni [3].
- *Epidermal Antenna for UHF-RFID Application* (Ankita Choudhury, Shambavi K2): viene presentata un'antenna epidermica che opera nella gamma UHF di 860-960 MHz; il progetto

proposto è un'antenna a fessura con dimensioni totali della patch di 66,10 x 45,95 mm<sup>2</sup>; il materiale del substrato considerato in questo progetto è il cotone tessile attinente al requisito di base dell'antenna epidermica di essere flessibile, confortevole sulla pelle, facilmente disponibile ed economico.

- *Flexible and Stretchable Antennas for Biointegrated Electronics (Zhaoqian Xie, Raudel Avila, Yonggang Huang, John A. Rogers)*: presenta i progressi combinati nella scienza dei materiali, nell'ingegneria meccanica e l'ingegneria elettrica per la realizzazione di antenne miniaturizzate ed estensibili [29].
- *Flexible Hybrid Sensors for Health Monitoring: Materials and Mechanisms to Render Wearability (Yuji Gao, Longteng Yu, Joo Chuan Yeo, Chwee Teck Lim)*: analizza sensori indossabili cercando di produrre una soluzione di continuità tra i dispositivi e la nostra pelle [5].
- *Stretchable and Flexible E-Fiber Wire Antennas Embedded in Polymer (Asimina Kiourti, John L. Volakis)*: viene presentato un nuovo processo per fabbricare antenne flessibile utilizzando fibre conduttrive (E-fibre) [7].
- *Fundamental Characteristics of Electro-Textiles in Wearable UHF RFID Patch Antennas for Body-Centric Sensing Systems (K. Koski, L. Sydänheimo, Y. Rahmat-Samii, L. Ukkonen)*: fornisce parametri critici di progettazione per l'identificazione a radiofrequenza (RFID) ad ultra-high-frequency (UHF) per antenne patch [8].
- *High-Geometrical-Accuracy Embroidery Process for Textile Antennas with Fine Details (Asimina Kiourti, John L. Volakis)*: viene presentato un processo di ricamo con alta precisione geometrica per antenne con dettagli fini [6].
- *Miniaturization of Wearable Electro-textile Antennas using Minkowski Fractal Geometry (Sankaralinagm Subramaniam, Sayantan Dhar, Kaushik Patra, Bhaskar Gupta, Lotfi Osmanl, Kais Zeouga, Ali Gharsallah)*: si occupa della miniaturizzazione di antenne elettrotessili tramite l'uso di geometrie frattali di Minkowski [24].
- *Flow and Thixotropic Parameters for Rheological Characterization of Hydrogels (Mihaela Violeta Ghica, Mircea Hîrjau, Dumitru Lupuleasa, Cristina-Elena Dinu-Pîrvu)*: descrive la progettazione di diversi idrogeli di carbossimetilcellulosa di sodio contenenti un farmaco modello BCS di classe II e di valutare le loro proprietà di flusso e tissotropiche.
- *On the Design of Wearable and Epidermal Antennas for Emerging Medical Applications (Nadeen R. Rishani, Raed M. Shubair, Ghadah Aldabbagh)*: presenta un sondaggio sullo stato dell'arte dei recenti progressi nelle antenne indossabili ed epidermiche per applicazioni mediche, con enfasi su come materiali e tessuti flessibili e leggeri che hanno un effetto importante sulla loro progettazione.[17]
- *Optically Transparent Antennas (Zachary J. Silva, Christopher R. Valenta, and Gregory D. Durgin)*: vengono confrontate le proprietà dei materiali conduttrivi trasparenti e delle mesh, dimostrando che, per applicazioni mediche, è conveniente utilizzare mesh di rame o di argento, in modo da avere maggiori prestazioni [23].
- *Polydimethylsiloxane-Embedded Conductive Fabric: Characterization and Application for Realization of Robust Passive and Active Flexible Wearable Antennas (Roy B. V. B. Simorangkir, Yang Yang, Raphael M. Hashmi, Toni Björnin, Karu P. Esselle, Leena Ukkonen)*: presenta la realizzazione di un'antenna indossabile utilizzando PDMS con l'inclusione di ceramici, dimostrandone maggiori prestazioni e soprattutto una maggiore miniaturizzazione del dispositivo.
- *New Generation Wearable Antenna Based on Multimaterial Fiber for Wireless Communication and Real-Time Breath Detection (Mourad Roudjane, Mazen Khalil, Amine Miled, Younés Messaddeq)*: viene presentata una nuova generazione di antenna indossabile, e il suo potenziale uso come un sensore senza contatto e non invasivo per il rilevamento del respiro umano; L'antenna è fatta di fibra multimateriale progettata per applicazioni di rete wireless a corto raggio con frequenza di 2.4 GHz [18].

- *Self-Tuning UHF Epidermal Antennas* (Francesco Amato, Carolina Miozzi, Simone Nappi, Gaetano Marrocco): tratta i sensori epidermici basati sull'identificazione a radiofrequenza che sono adatti ad essere applicati sulla pelle come uno strato sottile e flessibile e permettono di raccogliere parametri biofisici con un alto livello di comfort per l'utente [2].
- *A new approach to fabricate pdms structures using femtosecond laser* (Hamsapriya Selvaraj): dimostra un nuovo modo di indurimento rapido della resina PDMS su una scala temporale di microsecondi utilizzando l'irradiazione laser a femtosecondi [21].
- *Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey* (Rita Salvado, Caroline Loss, Ricardo Gonçalves Pedro Pinho): presenta una rassegna dei punti chiave per la progettazione e lo sviluppo di antenne tessili, dalla scelta dei materiali tessili all'intelaiatura dell'antenna [19].
- *Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art* (Bahare Mohamadzade, RaheelM Hashmi, Roy B. V. B. Simorangkir, Reza Gharaei, Sabih Ur Rehman, Qammer H. Abbasi): presenta una rassegna dettagliata dei metodi di fabbricazione e dei recenti progressi per le antenne flessibili [14].
- *Stretchable conductive elastomer for wireless wearable communication applications* (Zhibo Chen, Jingtian Xi, Wei Huang, Matthew M. F. Yuen): presenta la realizzazione di un'antenna costituita da Ag e PDMS mostrandone una maggiore flessibilità del materiale e una maggiore efficacia.
- *Stretchable conductive nanocomposite based on alginate hydrogel and silver nanowires for wearable electronics* (Chanhuk Lim, Yoonsoo Shin, Jaebong Jung, Ji Hoon Kim, Sangkyu Lee, Dae-Hyeong Kim): analizza antenne indossabili costruite mediante nanocomposito basato su idrogeli di alginato e nanofili d'argento mostrandone una maggiore conduttività elettrica e ionica, una maggiore estensibilità e morbidezza [9].
- *Through-body Communication Measurements Using Wearable and Implantable Sensor Antennas* (Abdul Quddious, Photos Vryonides, Symeon Nikolaou, Marco A. Antoniades, Muhammad Ali Babar Abbasi): presenta i parametri utilizzati per la comunicazione Through-the-body di antenne indossabili e impiantate [16].
- *PDMS, A Robust Casing for Flexible W-BAN Antennas* (Jovanche Trajkovikj, Jean-François Zürcher, and Anja K. Skrivenvik): viene descritta una nuova tecnologia per la realizzazione di antenne morbide, flessibili e facili da fabbricare attraverso l'utilizzo di reti metalliche su un substrato di PDMS mostrandone le alte prestazioni del substrato proposto [26].
- *Embroidered Conductive Fibers on Polymer Composite for Conformal Antennas* (Zheyu Wang, Lanlin Zhang, Yakup Bayram, John L. Volakis): vengono analizzate antenne conformali basate su fibre metallico-polimeriche conduttrive ricamate (E-fiber) su compositi polimero-ceramici mostrando che sono costituite da un'alta resistenza e flessibilità. I componenti E-Fiber vengono fabbricati usando il processo di ricamo automatico, seguito dall'assemblaggio con polidimetilsilossano e ceramica di titanato di terre rare [28].
- *Soft and Flexible Antennas on Permittivity Adjustable PDMS Substrates* (Jovanche Trajkovikj, Jean-François Zürcher, Anja K Skrivenvik): presenta una patch antenna su un substrato di PDMS e microsfere di vetro cave, mostrando che si riesce ad avere un miglioramento delle prestazioni dell'antenna in termini di larghezza di banda e di efficienza rispetto ad un substrato di PDMS puro [27].

La nostra attenzione si è focalizzata sull'articolo intitolato “Performance Comparison of Patch and Loop Antennas for the Wireless Power Transfer and Transcutaneous Telemetry in the 860-960 MHz Frequency Band” (C. Miozzi, G. Saggio, E. Gruppioni, G. Marrocco) [13]. Si è analizzata la geometria e i materiali utilizzati in questo paper per poi adattarli alla frequenza di interesse (868 MHz).

Dopo aver presentato le ricerche effettuate, lo step successivo ha riguardato la scelta dei vari materiali analizzati, per la realizzazione dell'antenna epidermica.

### 3 Scelta dei materiali

Per la scelta dei materiali il team si è focalizzato sulle specifiche riguardanti il substrato, lo strato adesivo e lo strato conduttore per la realizzazione dell'antenna finale. Tutti i materiali utilizzati sono caratterizzati da un'elevata flessibilità ed estensibilità. Inoltre, tutti i materiali devono essere traspiranti, leggeri, reperibili in tempi brevi e a basso costo. In particolare, lo strato conduttore deve rispecchiare un altro importante parametro, cioè deve avere un'elevata conducibilità. Il substrato, invece, oltre alle specifiche sopra citate, deve avere una buona tolleranza alle deformazioni meccaniche. Infine, lo strato adesivo deve essere biocompatibile, visto che andrà a contatto con la pelle.

#### 3.1 Substrato

Partendo dalla ricerca diversi substrati utilizzati in letteratura il team ha analizzato i pro e i contro quali:

- **Policloroprene:** caratterizzato da un'elevata elasticità ed un'eccellente resistenza alla deformazione permanente, ma in commercio si trovano solo fogli di colore scuro perciò è stato scartato perché non trasparente.
- **Policaprolattone:** è flessibile alle basse temperature, ha una buona resistenza chimica, termica e all'abrasione, tuttavia non è di facile reperimento.
- **Stirene-Etilene-Butilene-Stirene (SEBS):** caratterizzato da buone proprietà meccaniche ma difficile da riprodurre in laboratorio.
- **Forex:** ha un basso costo ed è un buon isolante ma le sue proprietà cambiano con il tempo, inoltre si degrada ad alte temperature ed è un materiale rigido.
- **PDMS:** polimero trasparente e flessibile, che se drogato con microsfere cave di vetro può diventare substrato con permittività regolabile, mentre se drogato con nanoparticelle di argento può funzionare come conduttore. Rappresenta il futuro delle tecnologie epidermiche, ma non è stato possibile utilizzarlo dato l'elevato costo.[27]
- **Silicone:** materiale semitrasparente e molto flessibile, facile da reperire, ma non traspirante.

Sono stati studiati anche i materiali tessili quali: cotone, cordura, lycra caratterizzati da una costante dielettrica molto bassa [15]. Inoltre, sono flessibili e traspiranti e le loro proprietà dielettriche dipendono dall'orientazione delle fibre, quindi potrebbero non essere sufficientemente rigide per i fini costruttivi dell'antenna.

#### 3.2 Strato adesivo

Successivamente sono stati analizzati i materiali per lo strato adesivo, in particolare sono stati studiati:

- **Idrogel:** materiale deumidificante, resistente e antibatterico.
- **Silicon idrogel:** come l'idrogel ma con una maggiore permeabilità all'ossigeno.
- **Polyanoacrylates:** materiale resistente e molto flessibile, biocompatibile e traspirante.
- **Silbione:** materiale innovativo, bicomponente, adesivo, resistente, flessibile, traspirante, biocompatibile e idrorepellente.

### 3.3 Conduttori

Infine, per i materiali conduttori sono stati presi in esame:

- **Graphen-based:** materiale con eccellenti proprietà meccaniche ma con un costo molto elevato.
- **Nanoparticelle:** caratterizzate da una conducibilità elevata ma difficili da reperire.
- **Spray conduttivo:** materiale di facile lavorazione, ma necessita più applicazioni affinchè sia sufficientemente conduttivo.
- **Polimeri conduttori:** materiale dal costo contenuto, molto flessibile ma con una bassa conducibilità (circa qualche centinaia di S/cm).
- **Ag-PDMS:** materiale molto flessibile e traspirante ma con una conducibilità molto bassa.
- **Electron o tessuto conduttivo:** materiale flessibile, traspirante e leggero, dalla conducibilità alta, ma di difficile fabbricazione.
- **Cu/Ag/Steel wire mesh:** materiali flessibili, traspiranti, sottili e dal costo contenuto, ma la fabbricazione è piuttosto complessa.
- **Cu/Ag conductive textiles:** materiali flessibili, ad alta conducibilità ma non sono traspiranti perciò necessitano di essere microforati [19].

Dopo aver analizzato i materiali sopra descritti, la scelta del materiale conduttivo è ricaduta sull'utilizzo di una **retina di acciaio**, visto che risulta abbastanza trasparente, sottile e traspirante, con ottimi valori di conducibilità, ma anche reperibile in tempi brevi e a basso costo. Inoltre, si è scelto di utilizzare il **rame adesivo** per poter confrontare i risultati ottenuti con la precedente [17]. Sono stati individuati anche i materiali dielettrici da utilizzare per l'ipotetica patch antenna e la loop antenna. E' stato scelto come substrato per la patch antenna il **silicone** [2]. Inoltre, si è scelto di incapsulare la patch antenna, in modo da renderla più compatta perciò il materiale scelto è stato l'**ecoflex**, già sperimentato in precedenza. Infine, come strato adesivo, è stato scelto il **Silbione** perchè risulta essere un materiale oltre che adesivo, anche traspirante, trasparente e flessibile.

## 4 Scelta antenna per interrogazione

### 4.1 Geometria

La scelta dell'antenna per interrogazione è ricaduta su due tipologie in particolare:

- **Slotted-folded patch:** una particolare tipologia di patch in cui l'elemento radiante è lo slot centrale. I cortocircuiti sono stati posti lateralmente e a specchio e costituiscono il parametro di Tuning in grado di spostare la frequenza di risonanza. In Figura 2 ne è riportata una schematizzazione. Saranno analizzate le geometrie 5x5 cm, 3x3 cm e 4x2.5 cm.

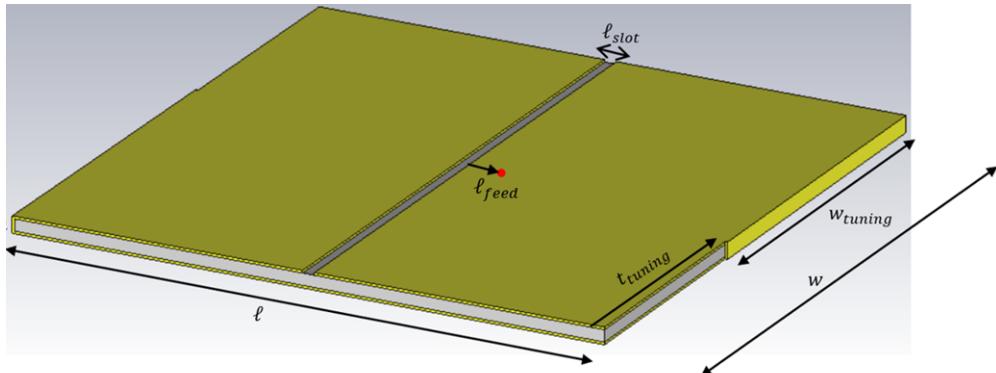


Figura 2: Patch antenna

- **Loop antenna:** la cui particolare geometria è riportata in *Figura 3*. Il conduttore poggia su uno strato di Ecoflex e Silbione ed è caratterizzato da due "denti" che costituiscono il parametro di Tuning: variandone la larghezza e la lunghezza si riesce a spostare la frequenza di risonanza. Saranno analizzate sia le geometrie 5x5 cm che 3x3 cm.

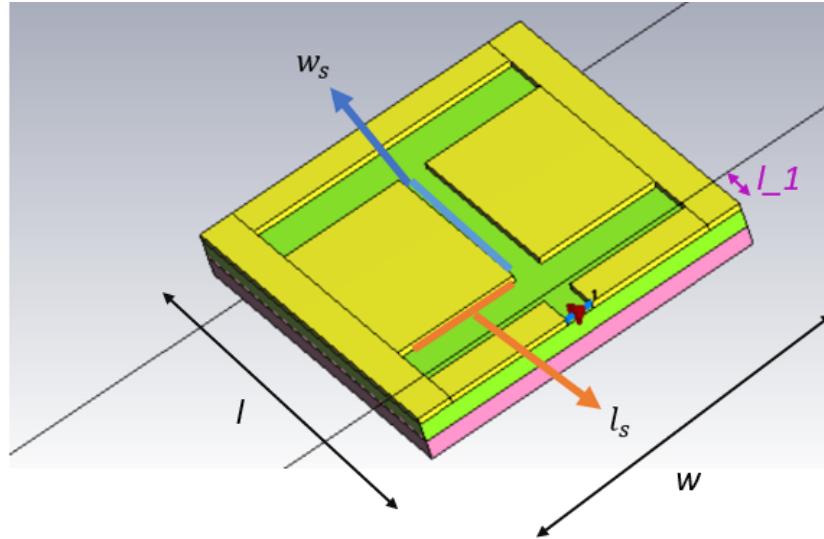


Figura 3: Loop antenna

## 4.2 Patch

La Patch antenna è immersa in uno strato di Ecoflex spesso circa 3 mm e aderisce alla testa (rappresentata attraverso un fantoccio costituito da elementi eterogenei) mediante uno strato di Silbione di spessore circa 0.1 mm. Ci si pone l'obiettivo di stabilire una comunicazione *Through-The-Body* a 868 MHz tra un reader esterno, rappresentato da una Folded-patch-antenna con slot centrale, (anche detta *Slotted-patch antenna*) e un dipolo miniaturizzato (lunghezza massima 12 mm) incapsulato all'interno di una capsula. La capsula rappresenterebbe, ad esempio, una protesi dentale. Quindi il modello sviluppato rappresenterebbe la comunicazione tra una patch antenna adesa alla guancia (la cui porta d'ingresso è numerata come "1") e un dispositivo impiantato (IMD) all'interno della cavità orale (la cui porta d'ingresso è numerata come "2").

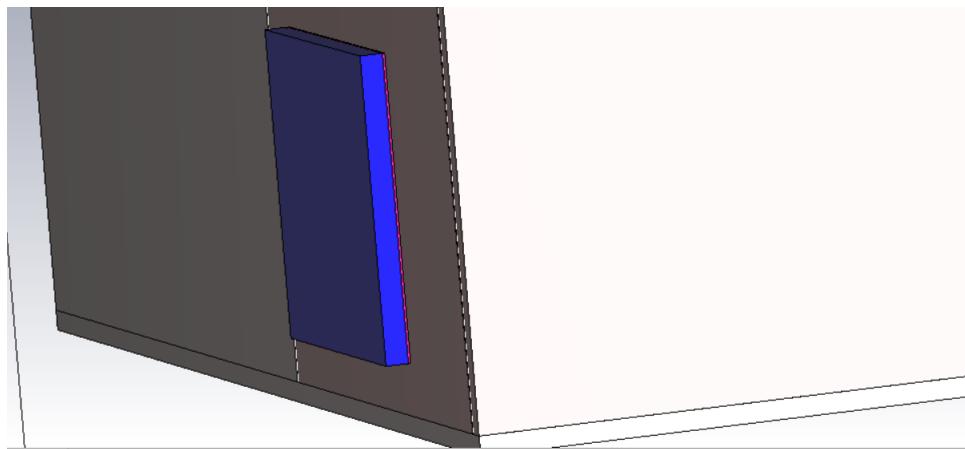


Figura 4: Capsula di Ecoflex-Silbione adesa alla guancia del fantoccio. Lo strato adesivo di Silbione (in rosa) è molto sottile.



Figura 5: Comunicazione Patch-dipolo

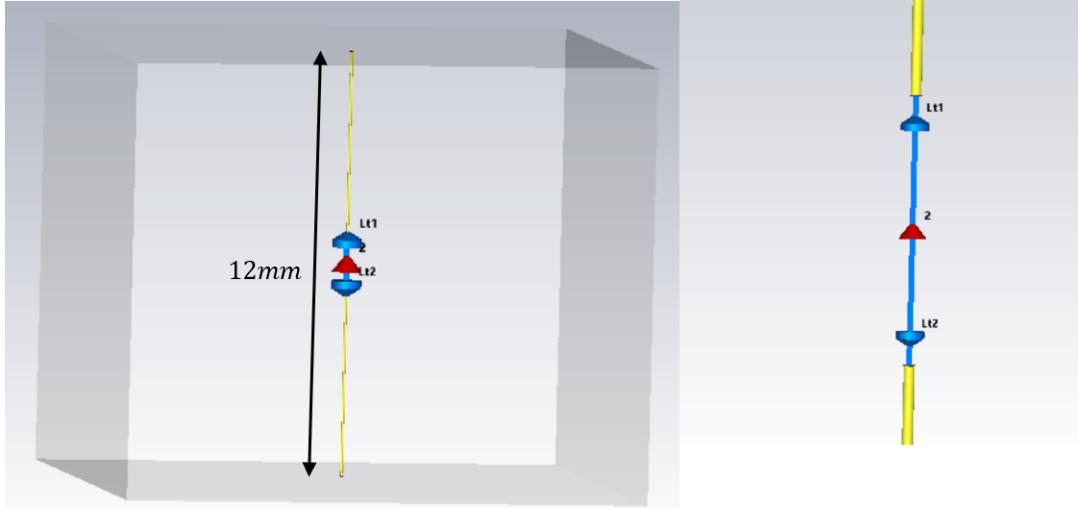


Figura 6: Dipolo miniaturizzato con Induttori di Tuning:  $L_{t1} = L_{t2} = L_{tuning}/2$ , essendo  $L_{tuning}$  il parametro di adattamento del dipolo è stato definito nel *Parameter List*

Per variare il coefficiente di riflessione  $S_{11}$ , è necessario agire sui "gradi di libertà" della patch antenna a disposizione, ovvero:

1. La larghezza  $w_{tuning}$  del bordo laterale che cortocircuita la patch al piano GND (viene modificata variando il parametro di  $t_{tuning}$ );
2. La posizione della porta di alimentazione rispetto al bordo dello slot centrale ( $\ell_{feed}$ );
3. La larghezza dello slot ( $\ell_{slot}$ ).

I restanti parametri sono, invece, vincolati dalle specifiche di progetto e dalla scelta dei materiali. La variabilità delle caratteristiche radiative di un'antenna può essere analizzata al calcolatore attraverso degli "Sweep parametrici".

#### 4.2.1 Patch 5x5

La patch 5x5 è stata l'antenna standard ispirata interamente a quanto esposto in [13]. Il primo passo è stato quello di sintonizzare la patch agendo sul parametro  $t_{tuning}$  e si è trovato che la sua

dimensione ottimale è di  $4.1\text{ cm}$ . Questo ci permette di avere ulteriori 9 mm a disposizione per aggiustare la risonanza dell'antenna una volta passati alla realizzazione del prototipo. Il parametro di scattering  $S_{11}$  al variare del parametro di tuning è riportato in *Figura 7*

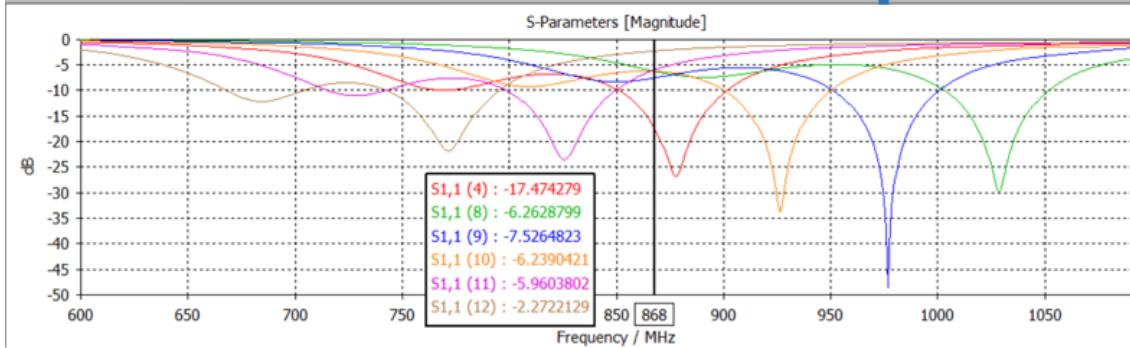


Figura 7:  $S_{11}$  al variare di  $t_{\text{tuning}}$

Successivamente si è deciso di agire sul punto di alimentazione  $\ell_{\text{feed}}$  per cercare di aggiustare la risonanza e adattare meglio l'antenna all'impedenza del generatore. Si è trovato che il parametro ottimale è  $\ell_{\text{feed}} = 1.5\text{cm}$  che, come si osserva in *Figura 2*, significa alimentare l'antenna in un punto molto prossimo al bordo non radiativo. In *Figura 8* sono riportati gli andamenti del coefficiente di riflessione  $S_{11}$  al variare proprio di questo parametro.

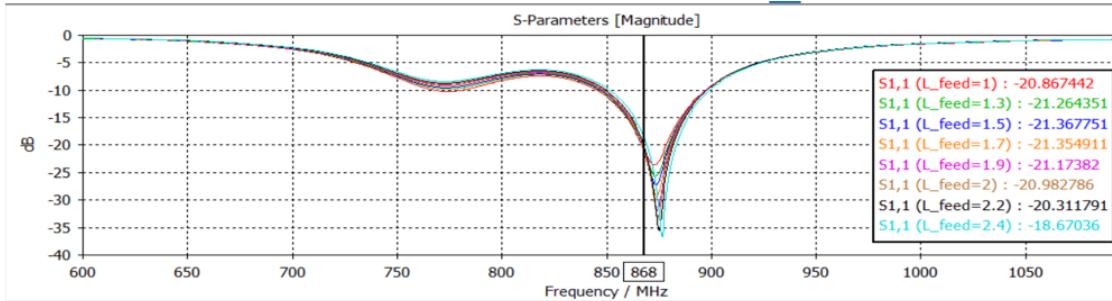


Figura 8:  $S_{11}$  al variare di  $L_{\text{feed}}$

Per quanto riguarda il tag, schematizzato come un dipolo, si è analizzato il parametro di scattering  $S_{22}$ . Per sintonizzarlo alla frequenza di 868 MHz si è sfruttata una induttanza di tuning e si sono eseguiti una serie di sweep parametrici su di essa. I risultati delle simulazione hanno evidenziato che l'ottimo si ha per  $L_{\text{tuning}} = 0.785\text{ }\mu\text{H}$ . Questi sono riportati in *Figura 9*.

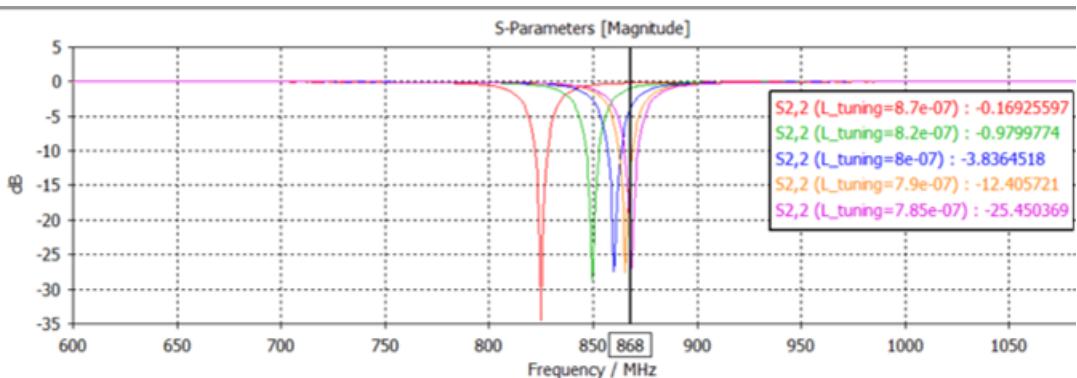


Figura 9:  $S_{22}$  per la patch 5x5

Si è anche visto come la variazione di  $L_{feed}$  e di  $t_{tuning}$  non vadano in alcun modo a modificare il la risonanza del dipolo, proprio come ci aspettavamo e come doveva essere, altrimenti la fase di test in laboratorio difficilmente avrebbe portato risultati soddisfacenti.

Per quanto riguarda l'**impedenza di ingresso**, calcolata dopo aver settato i parametri di  $\ell_{feed}$  e  $t_{tuning}$  al valore ottimale, si è ottenuto il seguente risultato:

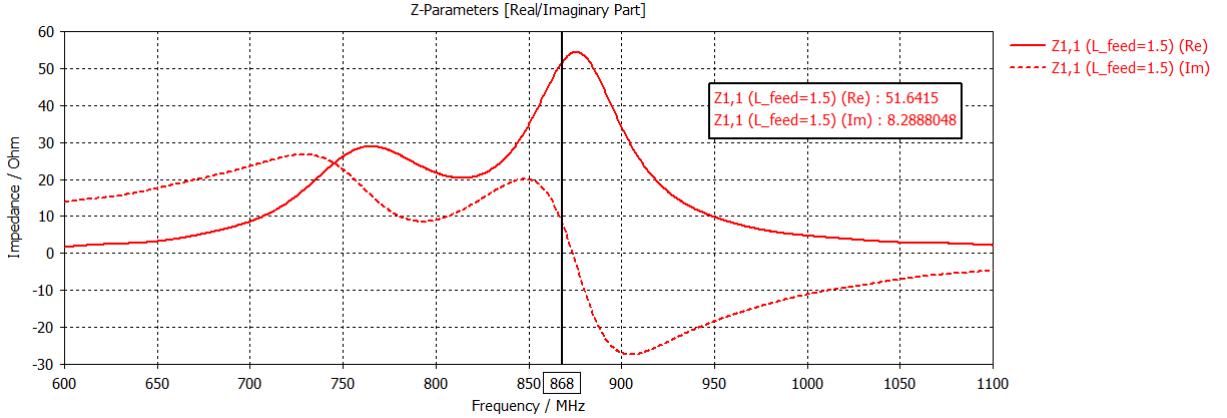


Figura 10: Parte reale e immaginaria dell’impedenza di ingresso

Come evidenziato in *Figura 10*, il valore della parte reale è quasi perfettamente adattato a 50  $\Omega$ , discorso leggermente diverso per la parte immaginaria che dovrebbe essere nulla. Si è dunque provato a effettuare un nuovo sweep su  $\ell_{feed}$  per vedere come variasse l’impedenza, ma i risultati riportati in *Figura 11*) hanno confermato il valore ottimo precedentemente trovato e quindi si è andati avanti con l’idea che questo fosse il miglior risultato possibile.

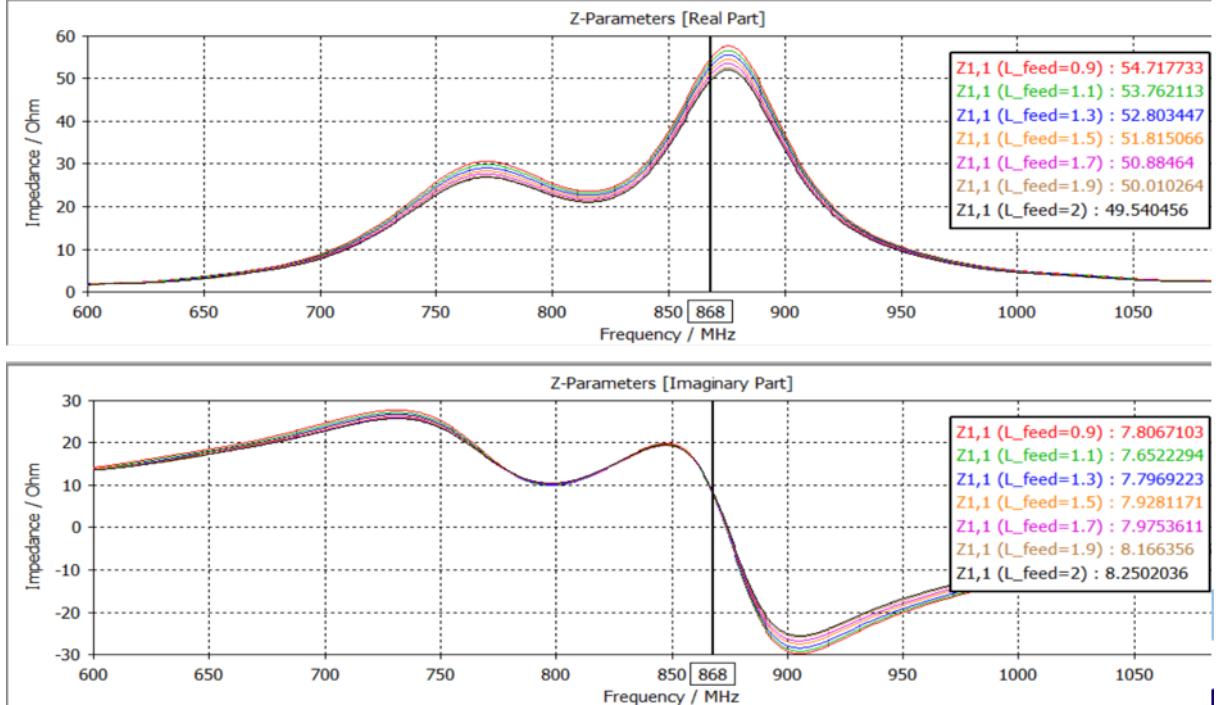


Figura 11: Z11 al variare di  $L_{feed}$

Infine, è stato anche analizzato l’andamento dei restanti parametri di scattering, in particolare del parametro  $S_{21}$ , dato che questo ha importanza per quanto concerne il guadagno di sistema.

Per valorizzare questi risultati, si è anche pensato di confrontarli sia per la patch orientata ortogonalmente al dipolo, sia per quella orientata parallelamente. Le due possibili configurazioni sono riportate nella seguente *Figura*:

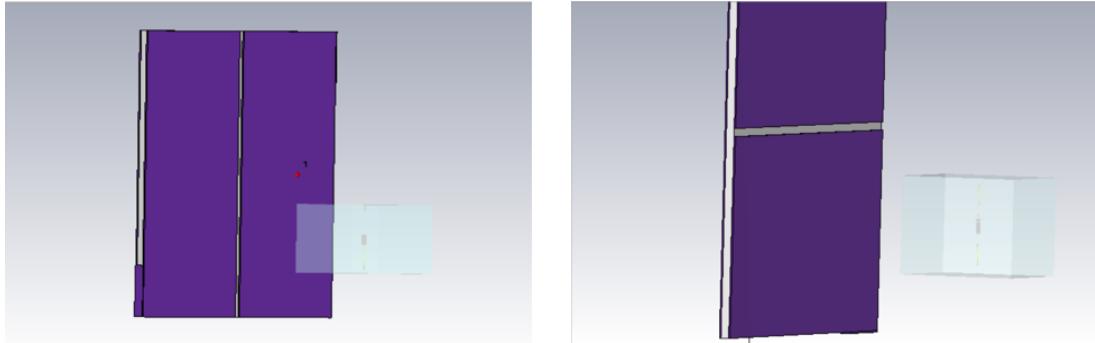


Figura 12: Orientazione parallela e ortogonale della patch rispetto al dipolo

Dunque, per quanto riguarda i restanti parametri di scattering:

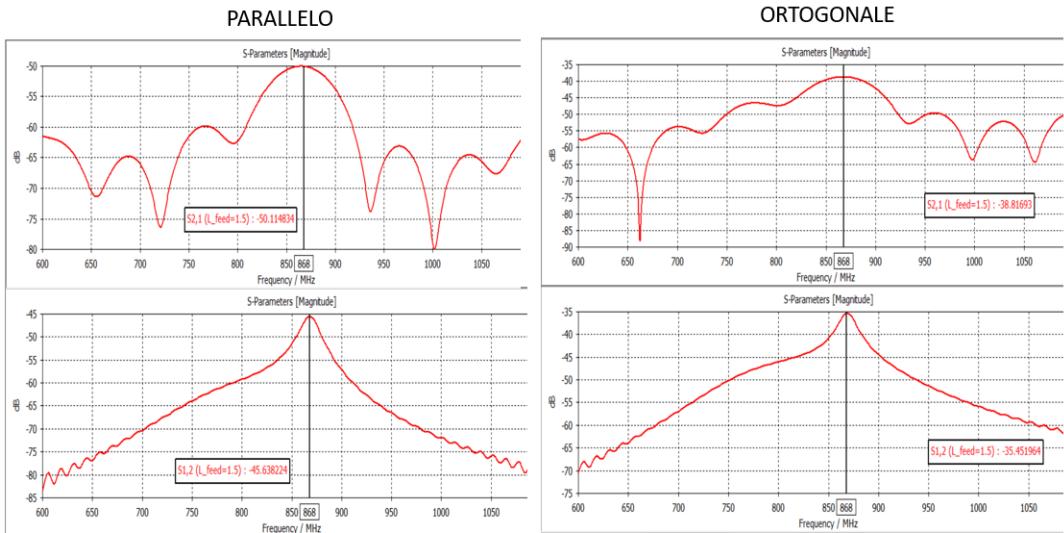


Figura 13:  $S_{21}$  e  $S_{12}$  per le configurazioni parallela e ortogonale

Il passo successivo è stato poi quello di calcolare il **guadagno di sistema** "g". Il calcolo è stato eseguito in post-processing implementando la seguente formula:

$$g = 10 \log_{10} \left( \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} \right)$$

Anche per il guadagno di sistema sono riportati i risultati ottenuti sia per l'orientazione ortogonale che parallela.

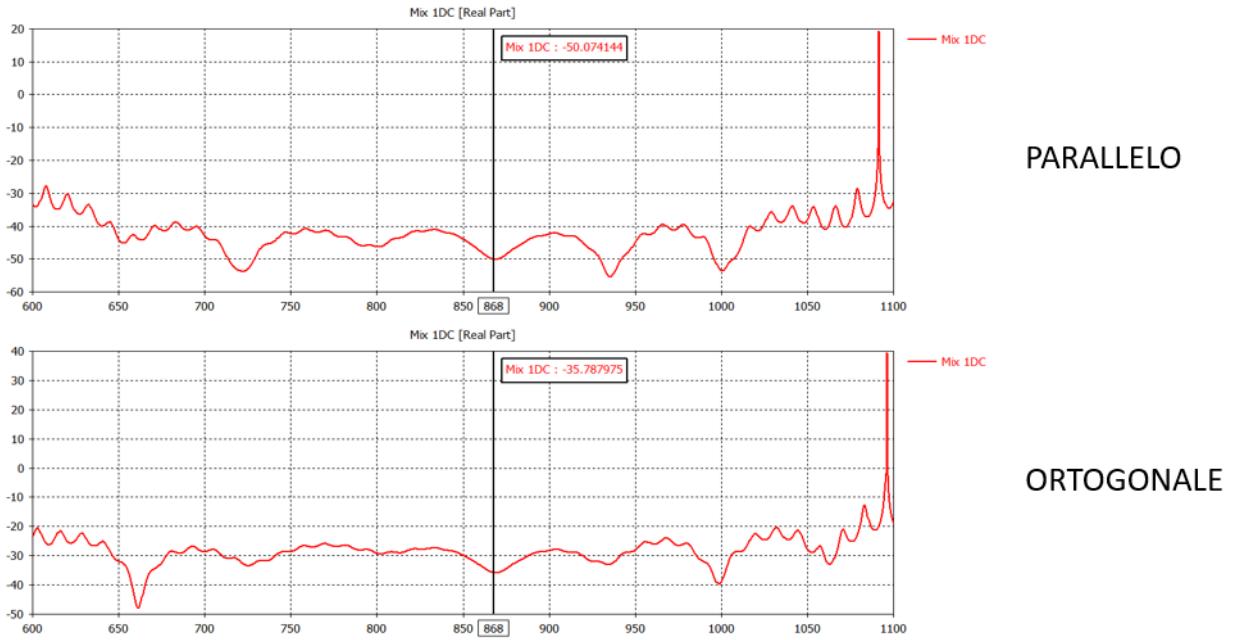


Figura 14: Guadagno di sistema per le due configurazioni

Come riportato in *Figura 14*, si ha un miglior guadagno di sistema per quanto riguarda l'orientazione ortogonale al dipolo e dunque tutti i risultati che seguono sono basati su questa disposizione. A questo punto si è quindi passati al calcolo del **SAR** per capire quanta potenza potesse essere fornita all'antenna senza eccedere i limiti di legge che ricordiamo essere di 2 W/Kg.

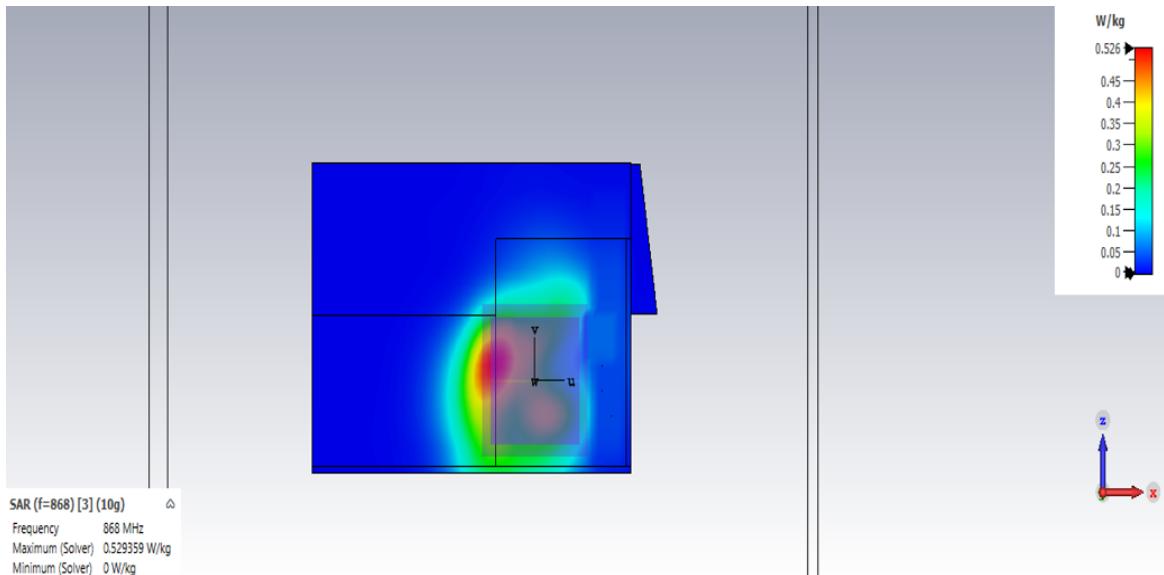


Figura 15: Distribuzione del SAR mediato su 10 g

Come si vede in *Figura 15*, il valore massimo di SAR che si raggiunge alimentando l'antenna con 0.5 W è di circa 0.53 W/Kg. A partire da questi valori si può calcolare la massima potenza erogabile dal generatore tramite una semplice proporzione e ciò che si evidenzia è:

$$P_{av,g}^{SAR=2W/Kg} = \frac{(0.5W \times 2 W/Kg)}{(0.53 W/Kg)} = 1.9 W = 32.78 dBm$$

Da qui si può quindi facilmente calcolare il **margine** di potenza a nostra disposizione, considerando una chip senitivity ( $p_c$ )=-16.6 dBm, tramite la seguente formula:

$$M|_{dBm} = P_{av,g(dBm)}^{SAR=2W/Kg} + g - p_c = 13.31 \text{ dBm} \simeq 21.43 \text{ mW}$$

#### 4.2.2 Patch 3x3

Una patch antenna di dimensioni  $3 \times 3\text{cm}$  costituisce un'antenna miniaturizzata per applicazioni a 868 MHz, il picco del suo coefficiente di riflessione si trova a frequenze ben maggiori rispetto a quella di interesse.

Gli Sweep Parametrici hanno mostrato che il parametro che più contribuisce nell'avvicinare l'antenna alla condizione di risonanza a 868 MHz è il parametro  $t_{tuning}$ . In particolare, all'aumentare di questo parametro, ovvero al ridursi di  $w_{tuning}$ , il picco del coefficiente di riflessione si sposta verso frequenze più basse coerentemente col fatto che restringendo questi cortocircuiti laterali si aumenta il percorso delle cariche elettriche. Invece, la parte immaginaria dell'impedenza d'ingresso può essere controllata dimensionando opportunamente la larghezza dello slot centrale, ovvero il parametro  $\ell_{slot}$ . Infatti, le due facce dello slot implementano uno pseudo-condensatore, la cui reattanza è negativa, e tende dunque a compensare il comportamento induttivo intrinseco di una patch miniaturizzata. Per quanto riguarda la posizione del punto di alimentazione, ovvero il parametro  $\ell_{feed}$ , esso non risulta essere un parametro così rilevante anche se, in minima parte, contribuisce a ridurre la parte reale dell'impedenza d'ingresso allontanandolo dallo slot centrale.

Per quanto riguarda questa diversa geometria, il solo controllo sui tre parametri di tuning precedentemente citati non è sufficiente per realizzare una patch antenna  $3 \times 3\text{cm}$  risonante alla frequenza di 868 MHz. Si è dunque definita una *incisione obliqua* in una delle due metà della patch antenna in modo da aumentare ulteriormente il percorso delle correnti (abbassando quindi la frequenza di risonanza) e da introdurre ulteriori parametri liberi ( $x_{inc}$ ,  $t_{inc}$  e  $\ell_{inc}$ ).

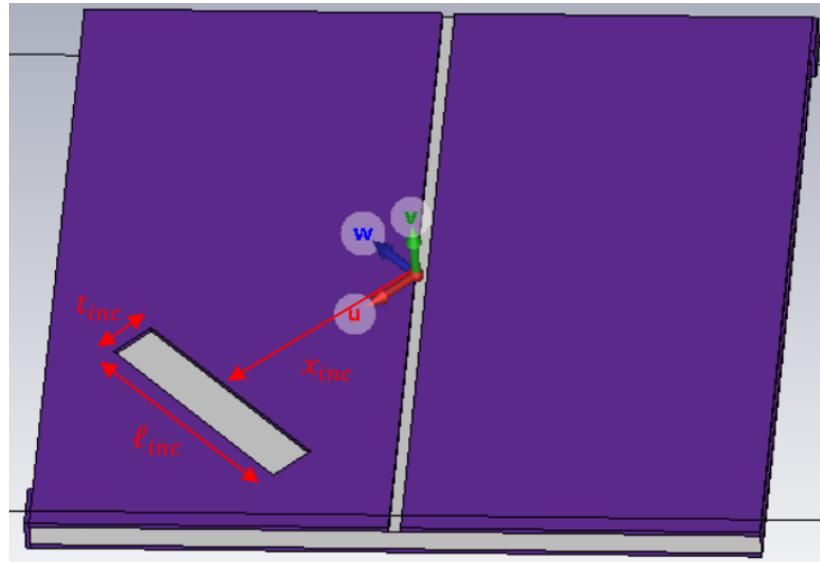


Figura 16: Slotted-Patch  $3 \times 3\text{cm}$  con incisione obliqua.

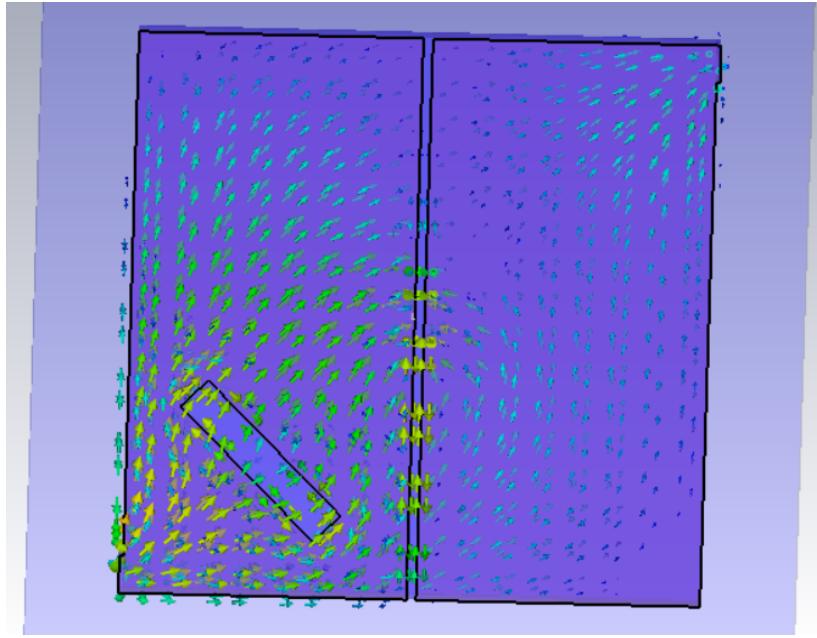


Figura 17: Andamento delle correnti sulla patch antenna con incisione obliqua ( $\ell_{inc} = 1cm$ ). Si può osservare un notevole aumento del loro cammino, a cui corrisponde un aumento della lunghezza d'onda “percepita” e quindi un abbassamento della frequenza di risonanza.

Analizzando l'effetto di questi nuovi parametri appena introdotti sulla parte reale ed immaginaria dell'impedenza d'ingresso della patch antenna ( $Z_{11}$ ) si è ottenuto che i valori dei parametri che consentono di minimizzare il coefficiente di riflessione  $S_{11}$  alla frequenza di 868 MHz sono:  $t_{tuning} = 2.68cm$ ,  $\ell_{slot} = 0.05cm$ ,  $\ell_{feed} = 1.3cm$ ,  $x_{inc} = 1cm$ ,  $t_{inc} = 0.2cm$  e  $\ell_{inc} = 1.5cm$ . Invece, per sintetizzare il dipolo alla medesima frequenza è necessario porre:  $L_{tuning} = 4.88 \times 10^{-7}H$ . A questi valori dei parametri corrispondono i seguenti andamenti dei coefficienti di riflessione:

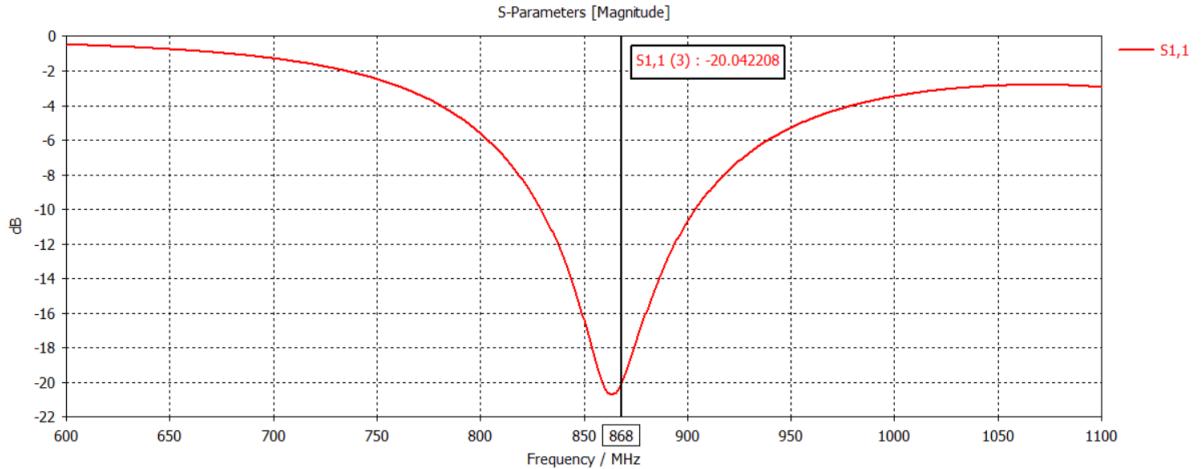


Figura 18: Andamento in frequenza del coefficiente di riflessione della patch-antenna.

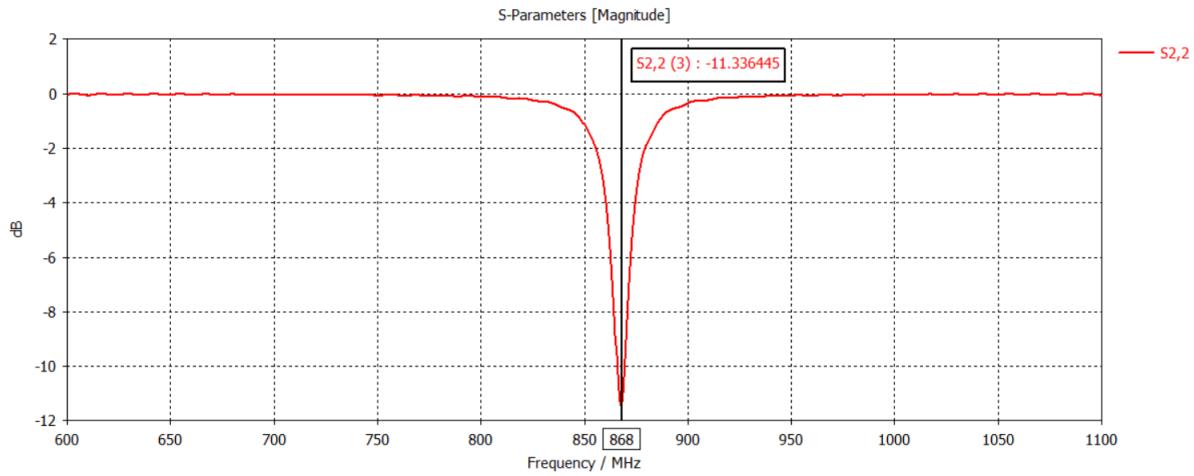


Figura 19: Andamento in frequenza del coefficiente di riflessione del dipolo.

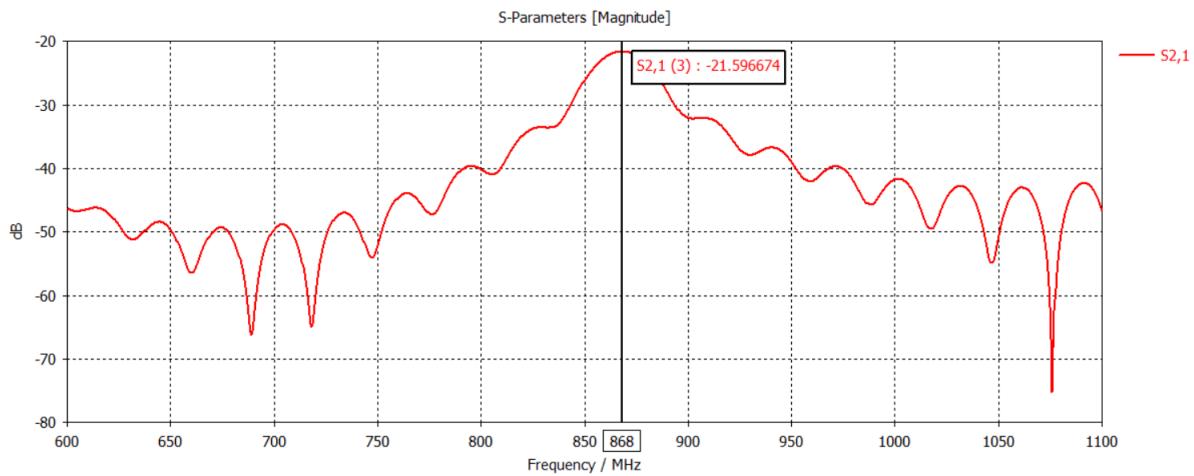


Figura 20: Andamento in frequenza del coefficiente di riflessione mutuo  $S_{21}$ .

Conseguentemente a questi valori dei parametri di scattering, il **guadagno di sistema** possiede l'andamento in frequenza mostrato nell'immagine seguente.

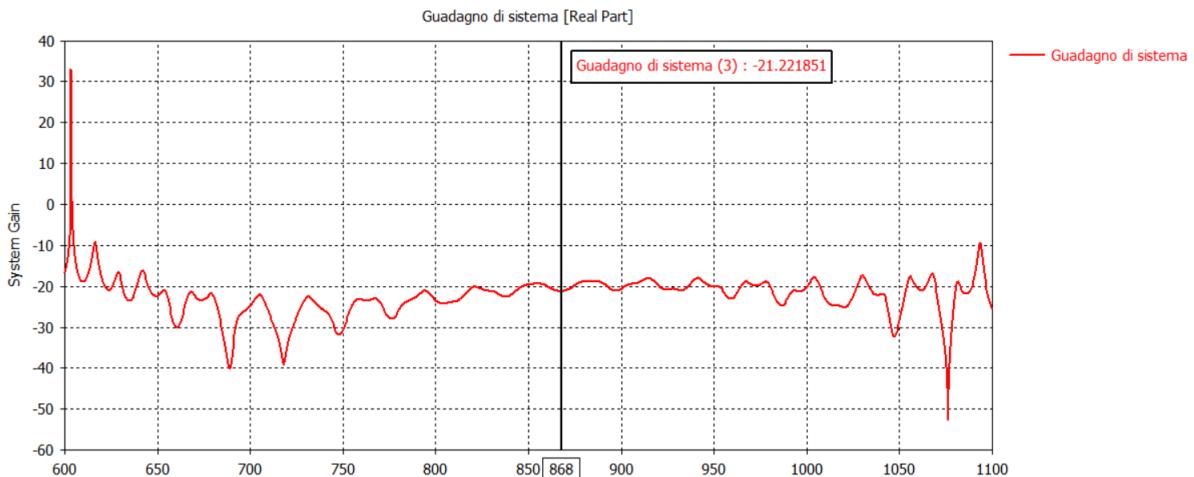


Figura 21: Andamento in frequenza del *guadagno di sistema*.

A questo punto si procede col calcolo del **SAR** in modo da poter poi caratterizzare successivamente il margine di comunicazione. Fornendo 0.5 W di potenza in ingresso alla porta d'ingresso della patch antenna si eccedono i valori riportati nelle normative per quanto riguarda la testa (il cui limite si ricorda essere pari a  $2W/Kg$ ).

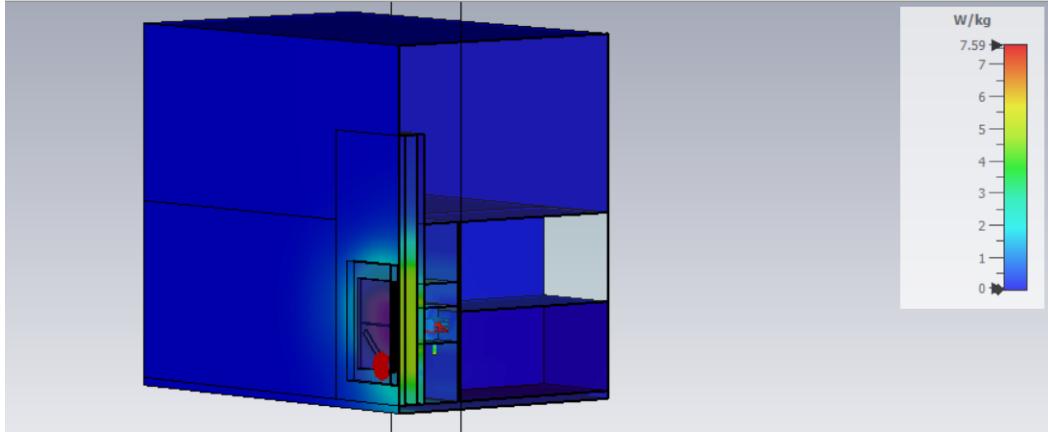


Figura 22: Distribuzione del *SAR* mediato su 10g sul fantoccio della testa.

Si vede dalla figura precedente che il massimo assorbimento di energia elettromagnetica per unità di massa si verifica immediatamente al di sotto del *Reader*, e risulta essere pari a  $7.59W/Kg$ . Sulla base di questi risultati, la potenza massima erogabile dal generatore, senza eccedere i limiti di *SAR*, è:

$$P_{av,g}^{SAR=2W/Kg} = \frac{(0.5W \times 2W/Kg)}{(7.59W/Kg)} = 0.132 W = 21.205 dBm$$

Avendo applicato una semplice proporzione in virtù del legame lineare tra la potenza disponibile al generatore e il *SAR*. Per cui, il margine risulta essere pari a:

$$M|_{dBm} = P_{av,g(dBm)}^{SAR=2W/Kg} + g - p_c = 16.583 dBm \simeq 45,53 mW$$

Le stesse operazioni sono state effettuate sostituendo il dipolo all'interno della capsula con il *Tag* progettato dai colleghi del *Team A* ottenendo un valore del guadagno di sistema e di margine molto simili a quelli appena mostrati.

#### 4.2.3 Patch 4x2.5

Considerazioni analoghe sono state applicate nel link *Through-The-Body* tra Slotted-patch di dimensioni  $4 \times 2.5cm$  e dipolo miniaturizzato.

<code>-# l_slot</code>	= 0.05	0.05	lunghezza slot
<code>-# l_feed</code>	= 1.5	1.5	punto alimentazione
<code>-# t_tuning</code>	= 2.355	2.355	
<code>-# w_tuning</code>	= w-t_tuning	0.145	
<code>-# l_inc</code>	= 1.6	1.6	lunghezza incisione
<code>-# x_inc</code>	= 1.3	1.3	posiz. lungo u di inc.
<code>-# t_inc</code>	= 0.2	0.2	spessore incisione
<code>-# w_inc</code>	= 0.35	0.35	traslaz. lungo w dell'incisi...
<code>-# L_tun</code>	5.173e-7	5.173e-7	induttanze

Figura 23: Valori dei parametri che hanno consentito di ottimizzare la comunicazione tra patch e dipolo.

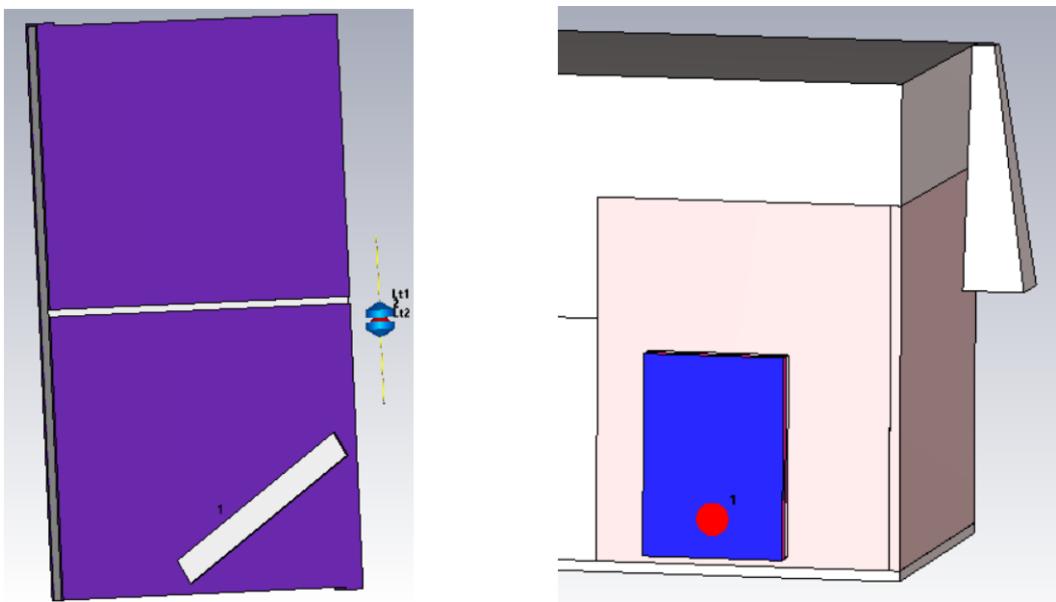


Figura 24: Patch  $4 \times 2.5\text{cm}$ .

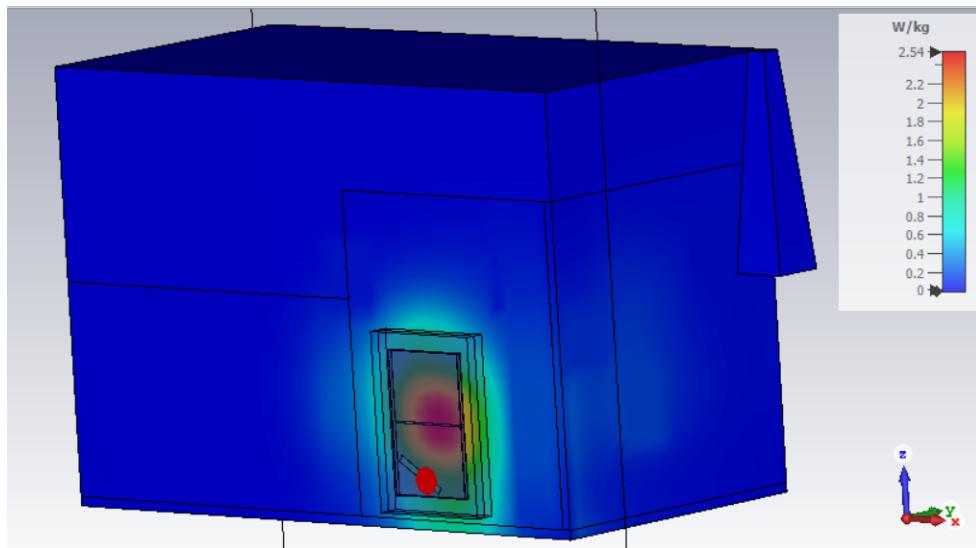


Figura 25: Distribuzione del *SAR* mediato su  $10g$  sulla testa alla frequenza di  $868\text{ MHz}$ .

Dal momento che erogando una potenza in ingresso pari a  $0.5\text{W}$  si eccede lievemente il limite di  $2\text{W/Kg}$  di assorbimento:

$$P_{av,g}^{SAR=2\text{W/Kg}} = 0.394\text{ W} = 25,954\text{ dBm.}$$

Per cui, il margine risulta essere pari a:

$$M|_{\text{dBm}} = P_{av,g(\text{dBm})}^{SAR=2\text{W/Kg}} + g - p_c = 19.136\text{ dBm} \simeq 81,95\text{ mW.}$$

## 4.3 Loop

La Loop Antenna è posta sopra uno strato di ecoflex spesso circa 0.1 cm e aderisce alla guancia mediante uno strato di silbione di spessore 0.1 cm. L'obiettivo è di stabilire una connessione trough-the-body alla frequenza di 868 MHz. Il modello sviluppato rappresenterebbe la comunicazione tra una loop antenna adesa sulla guancia (porta "1") e un dispositivo impiantato (IMD) all'interno della cavità orale (porta "2"). Per variare il coefficiente di riflessione  $S_{11}$ , è necessario intervenire sui parametri "liberi" della loop antenna a disposizione, ovvero:

1. La larghezza del "dente"  $w_s$
2. La lunghezza del "dente"  $l_s$

I restanti parametri sono legati alle specifiche di progetto e alla scelta dei materiali. La variabilità di questi due parametri può essere analizzata dal simulatore *CST Microwaves Studio* mediante *Sweep Parameters*. Sono state eseguite delle simulazioni relativamente alla posizione della porta di alimentazione sia parallela che ortogonale al dipolo (raffigurate in *Figura 26* e in *Figura 27*, rappresentante il tag.

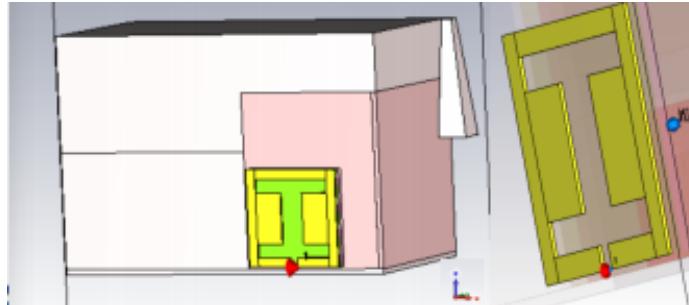


Figura 26: loop antenna perpendicolare al dipolo

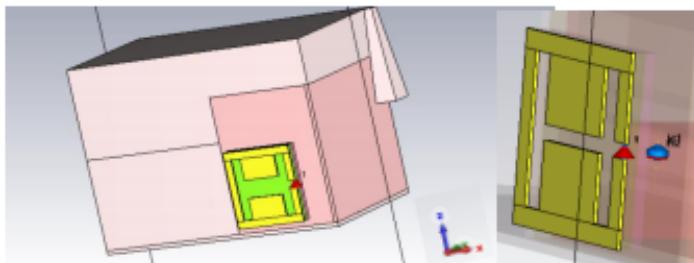


Figura 27: loop antenna parallelo al dipolo

### 4.3.1 Loop 5x5

Per quanto riguarda la geometria di dimensioni  $lxw=5x5$  cm, gli sweep parametrici hanno mostrato che aumentando il parametro  $l_s$ , il coefficiente di riflessione sposta il suo picco verso sinistra, perciò per ottenere una risonanza ottimale alla frequenza di lavoro (868 MHz) è stato opportuno scegliere come parametro  $l_s=1.8$  cm. Mentre aumentando il parametro  $w_s$  si è notato un abbassamento della curva del coefficiente di riflessione, perciò, nel caso di  $w_s$ , si è scelto come valore ottimale  $w_s=2.5$  cm. Queste simulazioni sono state effettuate considerando come conduttore sia il rame che la retina di acciaio evidenziando che in entrambi i casi la frequenza di risonanza e la geometria non cambiano e anche la curva del coefficiente di riflessione rimane inalterata.

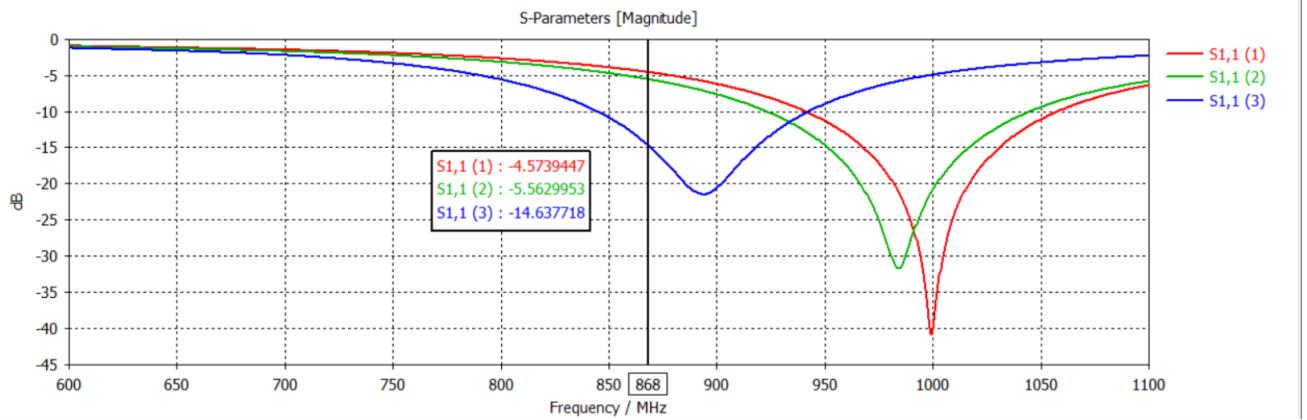


Figura 28: Sweep Parameters

Dopo aver analizzato la sintonizzazione dell'antenna e del dipolo all'interno della capsula, si è studiato l'andamento delle correnti del loop, sia dal lato adiacente alla guancia, quindi analizzando l'irradiazione, sia dal lato opposto, cioè verso l'esterno. Si è verificato il perfetto scorrimento delle correnti come mostrato in figura.

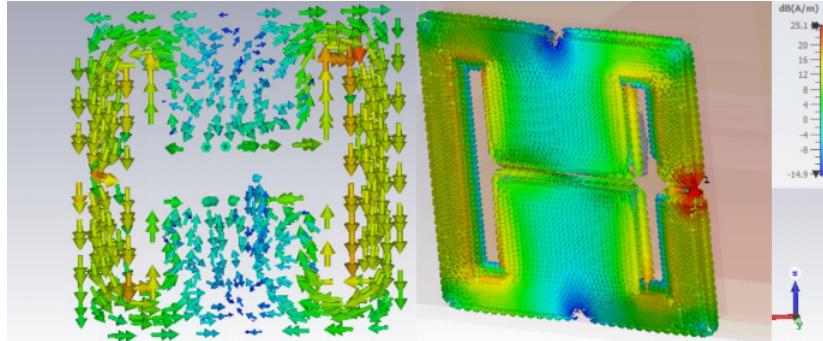


Figura 29: Andamento delle correnti back view (a sinistra), front view (a destra)

Si è analizzato, inoltre, il guadagno di sistema (*Figura 30*) per quanto riguarda il loop 5x5 implementando di nuovo la formula:

$$g = 10 \log_{10} \left( \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} \right)$$

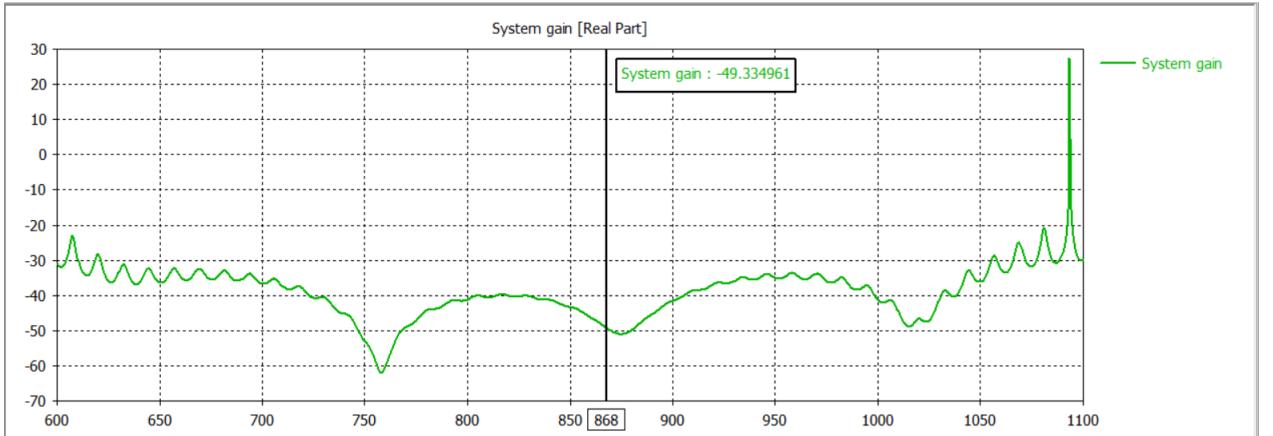


Figura 30: System gain loop 5x5

Successivamente, è stato calcolato il **SAR**, ovvero l'assorbimento di energia elettromagnetica per unità di massa. Il simulatore *CST Microwaves Studio* imposta autonomamente la potenza disponibile in ingresso al generatore pari a 0.5 W perciò, per la loop antenna 5x5 cm, si ottiene un SAR massimo mediato su 10 grammi pari a  $5.85W/Kg$ .

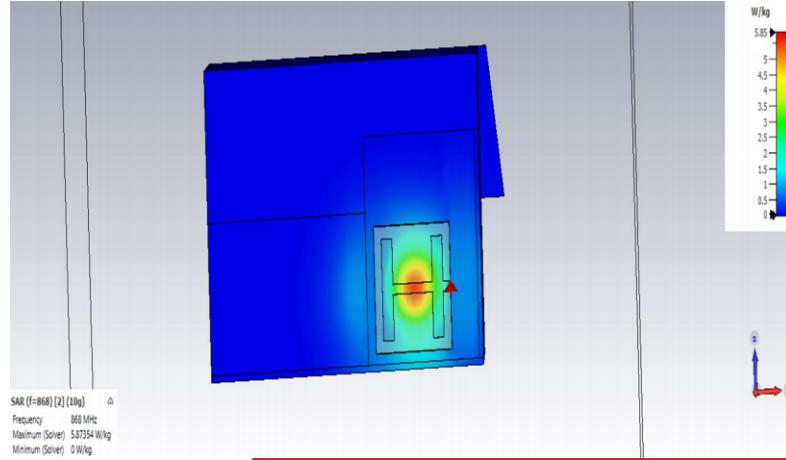


Figura 31: SAR massimo loop 5x5

Il limite di legge nazionale di SAR relativo alla testa corrisponde a  $2W/Kg$ , perciò partendo da tale limite si è ricavata la potenza massima utilizzabile, applicata al caso studiato, ovvero:

$$P_{av,g}^{SAR=2W/Kg} = \frac{(0.5W \times 2W/Kg)}{(5.85W/Kg)} = 0.171 W = 22.33 dBm$$

Per cui, il margine risulta essere pari a:

$$M|_{dBm} = P_{av,g(dBm)}^{SAR=2W/Kg} + g - p_c = 21.58 dBm \simeq 143.88 mW$$

Dopo aver ultimato le simulazioni, il team ha analizzato la fattibilità di realizzazione dell'antenna: qui è stata riscontrata una importante difficoltà in quanto bisognava utilizzare un balun per collegarla all'alimentazione. La decisione del team è stata quindi quella di escludere la loop antenna 5x5 cm.

#### 4.3.2 Loop 3x3

La loop antenna 3x3 cm presenta la stessa geometria e gli stessi materiali della loop antenna 5x5 cm. Anche in queste dimensioni si è fatto variare i due parametri di tuning  $l_s$  e  $w_s$  rispettivamente la lunghezza e la larghezza dello slot. Le misurazioni sono state eseguite inserendo un dipolo nella capsula dentale, lo stesso che è stato utilizzato nelle altre antenne. Sono state eseguite anche delle misurazioni ruotando l'antenna in modo che la porta fosse prima ortogonale al dipolo (indicata con *loop 1*) e poi parallela (indicata con *loop 2*), come mostrato in *Figura 32*.

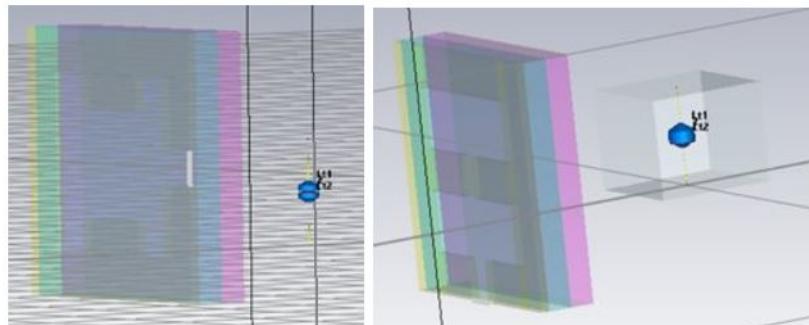


Figura 32: Loop antenna 3x3 cm posizionata ortogonalmente e parallelamente al dipolo

Simulando in queste condizioni, il coefficiente di riflessione  $S_{11}$  non mostrava alcuna risonanza alla frequenza di interesse (868 MHz).

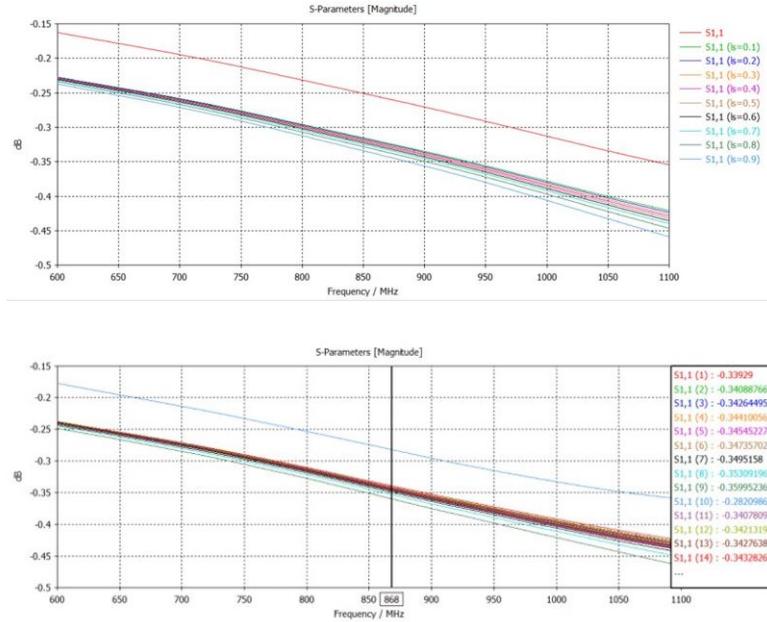


Figura 33: Coefficiente di riflessione  $S_{11}$  della *loop 1* e della *loop 2*

Ulteriore prova effettuata, è stata quella di ridurre a 0.3 cm la larghezza del conduttore che circonda il margine dell'antenna e aumentare la larghezza dello slot ( $w_s$ ) a 2.2 cm.

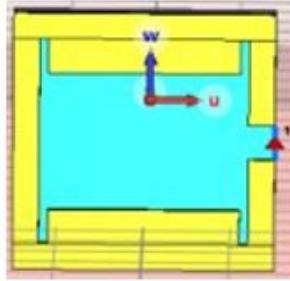


Figura 34: Loop 3x3 cm con  $w_s=2.2$  cm

Anche in questo caso, come è possibile vedere in *Figura 35*, il coefficiente di riflessione  $S_{11}$  non mostrava alcuna risonanza alla frequenza di interesse (868 MHz).

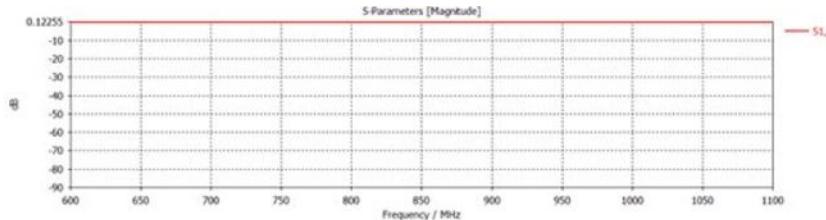


Figura 35: Coefficiente di riflessione  $S_{11}$  della Loop antenna 3x3 cm con  $w_s=2.2$  cm

Da questa analisi si è giunti alla conclusione che la loop antenna 3x3 cm non potesse soddisfare il nostro obiettivo, perciò è stata esclusa.

## 5 Ottimizzazione e Sviluppo

### 5.1 Realizzazione dei prototipi

Dopo aver ultimato le simulazioni mediante *CST Microwaves Studio*, l'attenzione è stata posta sulla realizzazione del prototipo in laboratorio. Sono stati effettuati vari modelli di antenna epidermica, principalmente di tipo **Patch 5x5 cm**, realizzati con materiali differenti.

La prima antenna realizzata, è stata costruita utilizzando come conduttore la **retina di acciaio** e come substrato il **silicone** [2]. Nella realizzazione di quest'ultima antenna, sono state riscontrate delle difficoltà per quanto riguarda l'adesione del conduttore al substrato. Sono state provate varie tecniche tra cui la cucitura e l'incollaggio mediante una colla, con basse perdite, chiamata *Saratoga*.



Figura 36: Prototipo realizzato con cucitura e incollaggio

Altre difficoltà riscontrate riguardano la saldatura del connettore alla retina di acciaio. Infatti, la problematica riscontrata, e non valutata precedentemente, è stata quella di non riuscire a saldare, mediante lo stagno, la retina di acciaio al connettore. L'idea è stata quella di posizionare dei dischetti di rame sull'acciaio, al di sotto del connettore, come si può vedere nella *Figura 37*:

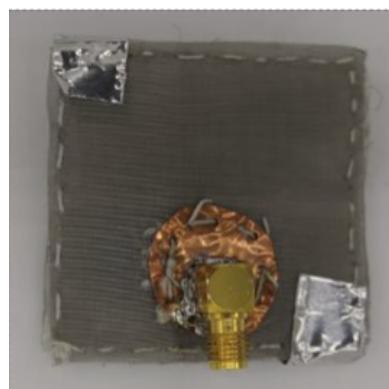


Figura 37: Disco di rame adesivo utilizzato per permettere la saldatura del connettore

In questo modo il problema della saldatura è stato risolto. L'antenna è stata poi simulata, alimentandola con un cavo coassiale e poggiandola sul fantoccio di muscolo di vitello mediante uno strato di ecoflex e silbione, ma non mostrava alcuna risonanza alla frequenza di interesse (868MHz), probabilmente a causa delle tecniche di realizzazione.

Successivamente è stata realizzata una seconda antenna Patch 5x5 cm, costruita, utilizzando come materiale conduttore il **Flectron** [19] e come substrato il silicone [2]. Anche per questa antenna sono state riscontrate delle difficoltà per quanto riguarda la saldatura del connettore al flectron. La problematica è stata la seguente: il tessuto era molto sensibile all'elevata temperatura del saldatore perciò si rischiava di forarlo; quindi, anche in questo caso, sono stati inseriti dei dischetti di rame tra il connettore e il tessuto. Va aggiunto che, rispetto agli altri materiali, il flectron ha mostrato una capacità adesiva notevole sia nei confronti del rame che del substrato siliconico. E' stata quindi simulata anche questa seconda antenna, alimentandola con un cavo coassiale e ponendola sul fantoccio e, come la precedente, non mostrava alcuna risonanza alla frequenza di interesse (868MHz), ma in questo caso non si è riusciti ad individuare il problema. Il prototipo è riportato in *Figura 38*:

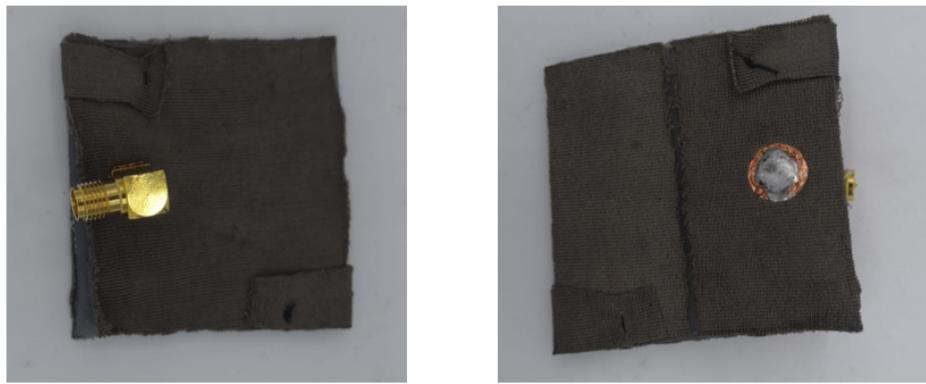


Figura 38: Prototipo dell'antenna realizzata con il flectron

E' stata inoltre realizzata una terza antenna Patch 5x5 cm utilizzando come materiale conduttore il **tessuto di rame** [19] e come substrato il silicone [2]. Anche per questa antenna si è riscontrata la stessa problematica avuta per il flectron, cioè che durante la saldatura si rischiava di forare il tessuto vista l'elevata temperatura del saldatore. Anche in questo caso, il problema è stato risolto inserendo dei dischetti di rame adesivo tra il connettore e il tessuto. Come le precedenti antenne descritte, alimentando l'antenna con il cavo coassiale e ponendola sul fantoccio non si osservava nessuna risonanza alla frequenza di interesse (868MHz), anche in questo caso non si è riusciti ad individuare il problema. Il prototipo è riportato in *Figura 39*.

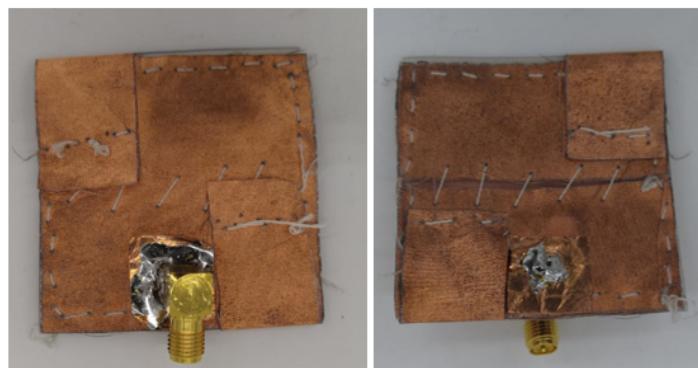


Figura 39: Prototipo dell'antenna realizzata con il tessuto di rame

L'ultima antenna realizzata è stata una Patch 5x5 cm costituita da **rame adesivo** [17] e silicone [2]. È stata ritagliata mediante *Plotter* e poi riportata sul substrato di silicone mediante un *Transfer*. Non si è riscontrata nessuna problematica riguardo alla saldatura. Inoltre, gli spigoli "liberi" sono stati cuciti al silicone per evitare l'usura dell'antenna. In *Figura 40* è riportato il prototipo realizzato.



Figura 40: Prototipo dell'antenna in rame adesivo

A differenza delle altre antenne realizzate, quest'ultima, alimentandola con il cavo coassiale e ponendola sul fantoccio, mostrava un picco nel grafico di  $S_{11}$  perciò è stato modificato il parametro di Tuning, aggiungendo del rame adesivo in modo che  $w_{tuning}$  fosse pari a 1.4 cm. In questo modo l'antenna risuonava alla frequenza di interesse (868MHz), come si può notare nella *Figura 41*.

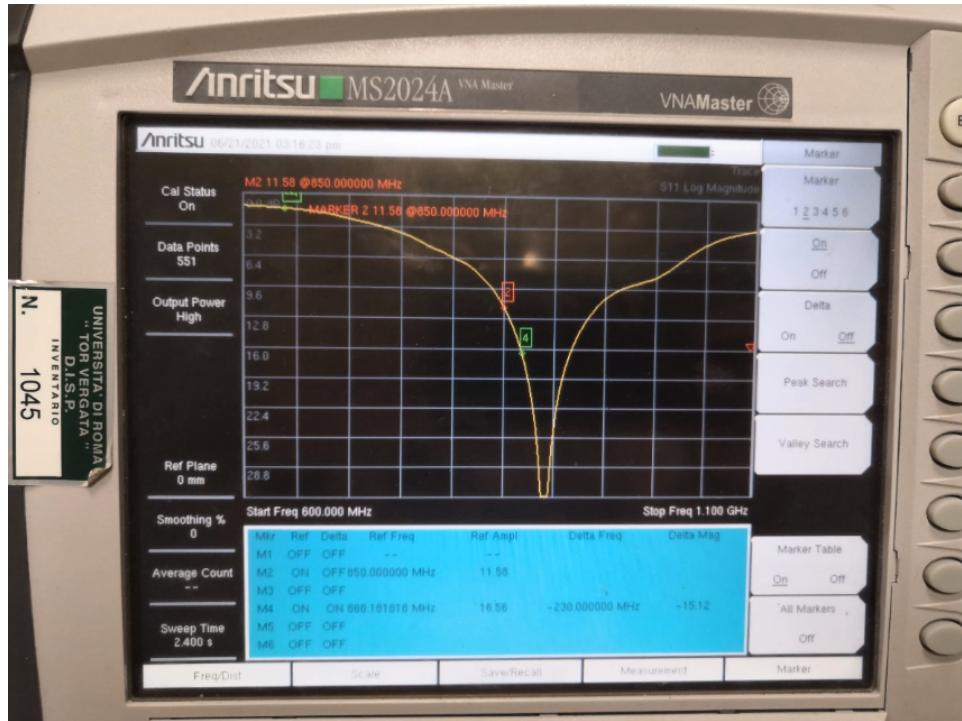


Figura 41: Risultato della misurazione sperimentale su fantoccio

Quindi, è stata utilizzata quest'ultima antenna per ultimare le misure, dopo essere stata incapsulata in uno strato di ecoflex e silbione precedentemente preparati in laboratorio.

## 5.2 Misurazioni

Successivamente, si è passati alla misurazione del parametro  $S_{11}$  (riportato in *Figura 42*) tramite un *VNA Analyzer* su un fantoccio di muscolo di vitello e, visti gli ottimi risultati ottenuti, si è passati a misurare il coefficiente di riflessione  $S_{11}$ , questa volta ponendo l'antenna sulla guancia di più volontari, i cui risultati sono riportati in *Figura 43 e successive*. In tutti i volontari, tranne uno, è stato dimostrato l'effettivo funzionamento dell'antenna alla frequenza 868 MHz. Il risultato negativo, ovvero la non risonanza alla frequenza di interesse, riportato in *Figura 48*, può essere giustificato dalla presenza della barba sulla guancia del volontario. Di seguito, in *Figura 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48* si riportano tutti i vari risultati ottenuti con il *VNA Analyzer*.

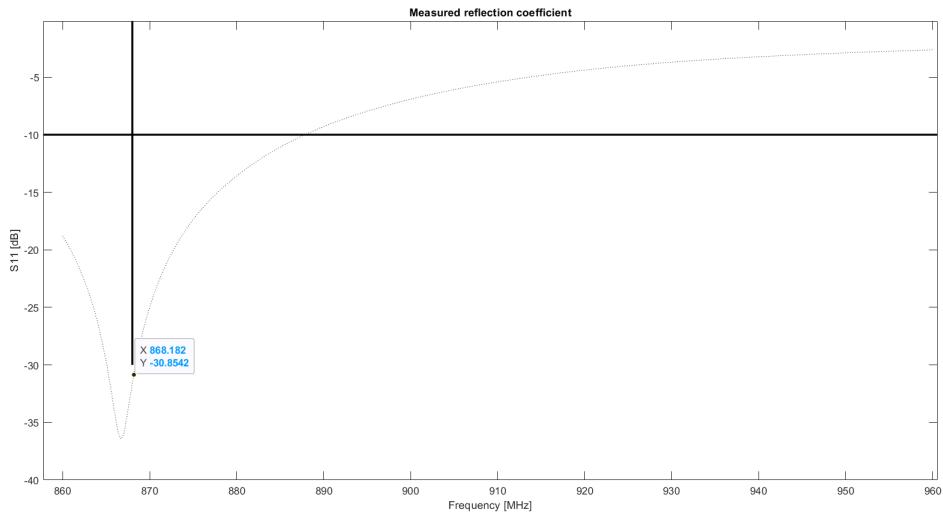


Figura 42: Coefficiente di riflessione dell'antenna su fantoccio di muscolo di vitello

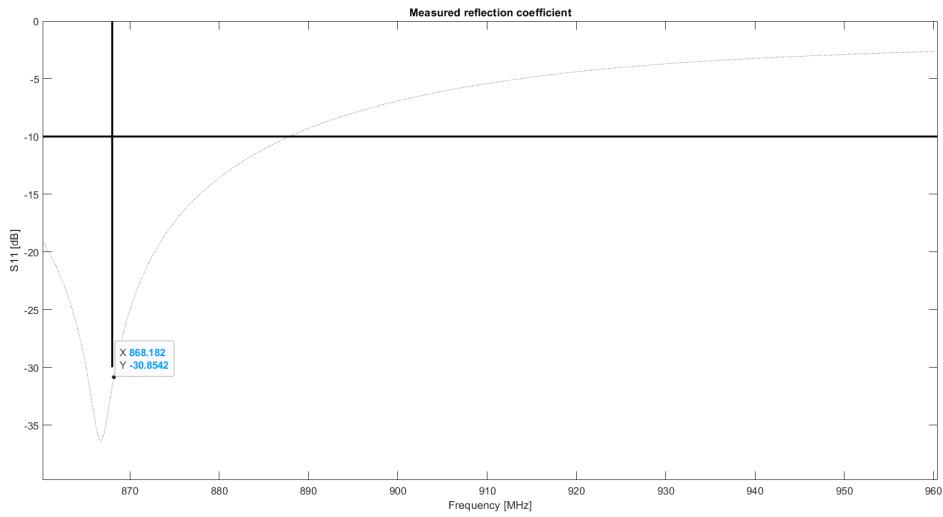


Figura 43: Coefficiente di riflessione dell'antenna sul volontario 1

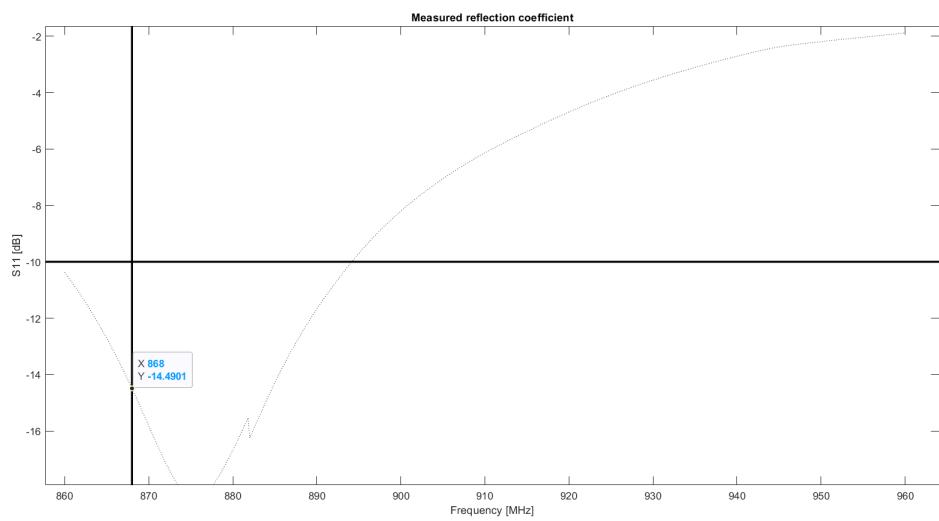


Figura 44: Coefficiente di riflessione dell'antenna sul volontario 2

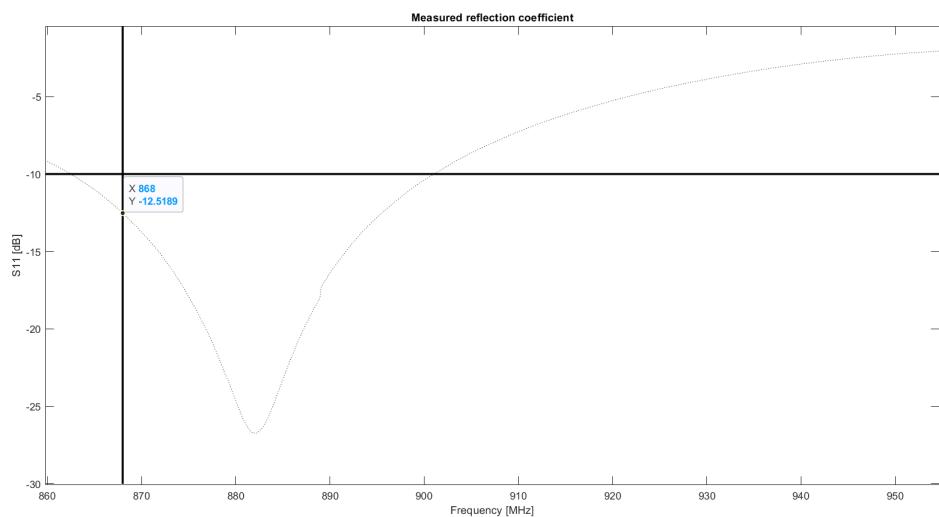


Figura 45: Coefficiente di riflessione dell'antenna sul volontario 3

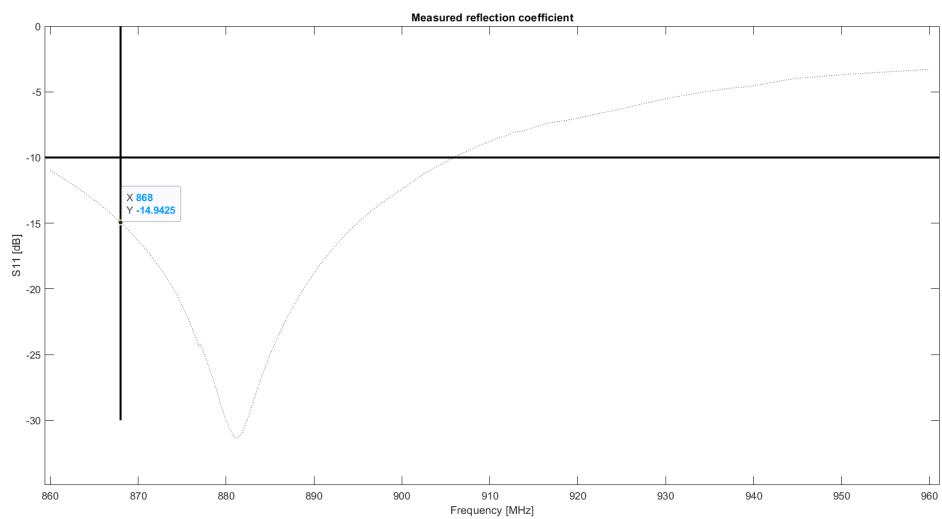


Figura 46: Coefficiente di riflessione dell'antenna sul volontario 4

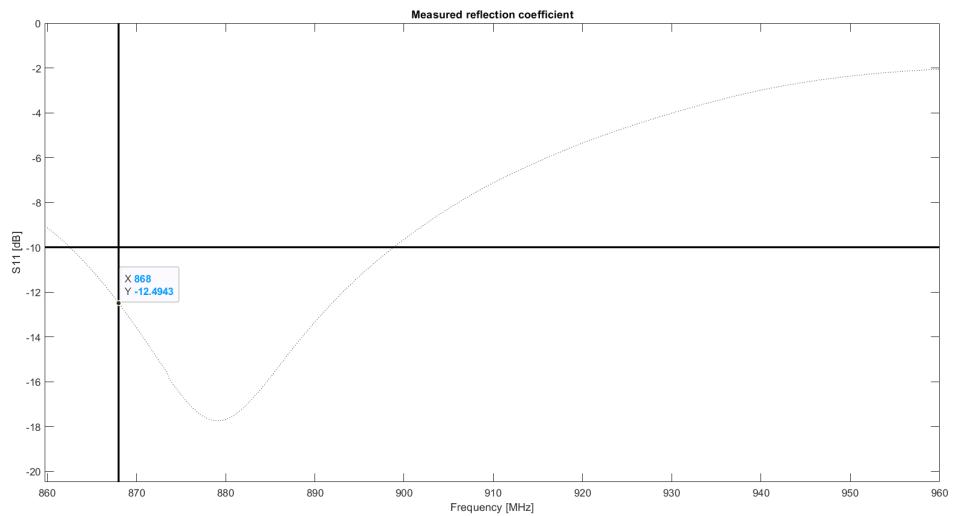


Figura 47: Coefficiente di riflessione dell'antenna sul volontario 5

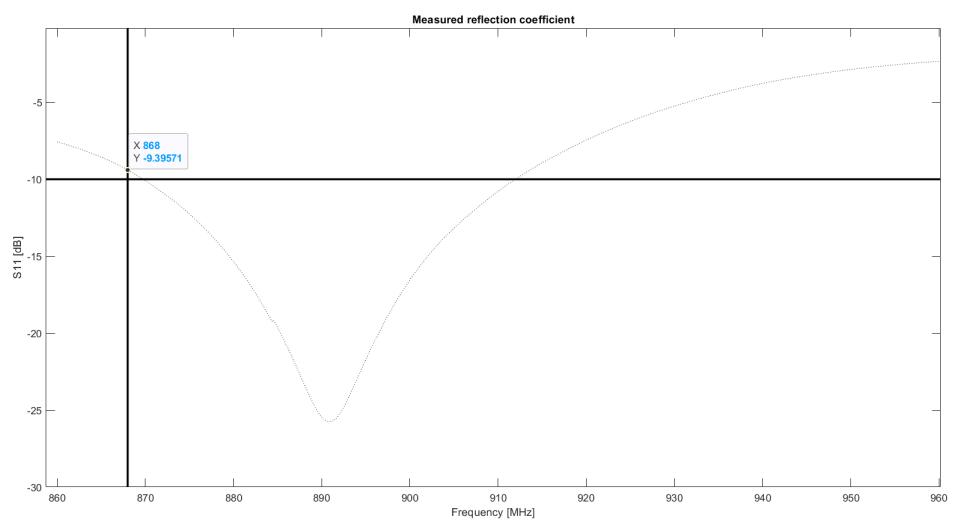


Figura 48: Coefficiente di riflessione dell'antenna sul volontario 6

## 6 Conclusione

In conclusione, l’obiettivo del team sulla realizzazione di un’antenna flessibile e traspirante è stato raggiunto; partendo dall’antenna di riferimento in [13] come geometria si è riusciti a realizzare un’antenna di tipo patch in rame adesivo ma con l’aggiunta di un substrato siliconico che la rende flessibile. L’antenna è stata incapsulata all’interno di un doppio strato di Ecoflex per mantenerla stabile e adesa sulla guancia grazie allo strato di Silbione. La ricerca effettuata potrebbe avere sviluppi futuri con l’utilizzo di diversi materiali per quanto riguarda lo strato conduttivo, come illustrato nella *sezione 5*. Dal punto di vista medico, questa applicazione risulterebbe vantaggiosa per il monitoraggio a distanza di un impianto dentale, sviluppando un’apposita piattaforma di raccolta ed elaborazione dati.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Abdulrahman Shueai Mohsen Alqadami et al. «Assessment of PDMS Technology in a MIMO Antenna Array». In: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 15 (2016), pp. 1939–1942. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2513960.
- [2] Francesco Amato et al. «Self-Tuning UHF Epidermal Antennas». In: *2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA)*. 2019, pp. 380–383. DOI: 10.1109/RFID-TA.2019.8892222.
- [3] Rakesh Das et al. «Engineered elastomeric bio-nanocomposites from linseed oil/organoclay tailored for vibration damping». In: *RSC Adv.* 4 (103 2014), pp. 59265–59274. DOI: 10.1039/C4RA11797B. URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C4RA11797B>.
- [4] Ping Du, Xi Lin e Xin Zhang. «Dielectric constants of PDMS nanocomposites using conducting polymer nanowires». In: *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*. 2011, pp. 645–648. DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969789.
- [5] Yuji Gao et al. «Flexible Hybrid Sensors for Health Monitoring: Materials and Mechanisms to Render Wearability». In: *Advanced Materials* 32.15 (2020), p. 1902133. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201902133>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201902133>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201902133>.
- [6] Asimina Kiourti e John L. Volakis. «High-Geometrical-Accuracy Embroidery Process for Textile Antennas With Fine Details». In: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 14 (2015), pp. 1474–1477. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2363556.
- [7] Asimina Kiourti e John L. Volakis. «Stretchable and Flexible E-Fiber Wire Antennas Embedded in Polymer». In: *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 13 (2014), pp. 1381–1384. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2339636.
- [8] K. Koski et al. «Fundamental Characteristics of Electro-Textiles in Wearable UHF RFID Patch Antennas for Body-Centric Sensing Systems». In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 62.12 (2014), pp. 6454–6462. DOI: 10.1109/TAP.2014.2364071.
- [9] Chanhyuk Lim et al. «Stretchable conductive nanocomposite based on alginate hydrogel and silver nanowires for wearable electronics». In: *APL Materials* 7.3 (2019), p. 031502. DOI: 10.1063/1.5063657. eprint: <https://doi.org/10.1063/1.5063657>. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5063657>.
- [10] Hung-Wei Lo et al. «Dual-Wideband Patch-Slot Loop Textile Antenna for WBAN/WiFi/LTE Applications». In: *2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*. 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/COMCAS44984.2019.8958369.
- [11] L. Ma et al. «A wearable flexible multi-band antenna based on a square slotted printed monopole». In: *2008 Loughborough Antennas and Propagation Conference*. 2008, pp. 345–348. DOI: 10.1109/LAPC.2008.4516937.
- [12] Georgi Marinov et al. «Aluminum-doped zinc oxide thin films deposited by electrospray method». In: *Optical Materials* 89 (2019), pp. 390–395. ISSN: 0925-3467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.01.055>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925346719300783>.
- [13] C. Miozzi et al. «Performance Comparison of Patch and Loop Antennas for the Wireless Power Transfer and Transcutaneous Telemetry in the 860–960 MHz Frequency Band». In: *2019 IEEE 16th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*. 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/BSN.2019.8771087.
- [14] Bahare Mohamadzade et al. «Recent Advances in Fabrication Methods for Flexible Antennas in Wearable Devices: State of the Art». In: *Sensors* 19.10 (2019). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19102312. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/10/2312>.
- [15] Kushal Tuckley Pranita Manish Potey. «Design of wearable textile antenna with various substrate and investigation on fabric selection». In: *2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP)*. 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICMAP.2018.8354539.

- [16] Abdul Quddious et al. «Through-body Communication Measurements Using Wearable and Implantable Sensor Antennas». In: *2019 Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC)*. 2019, pp. 53–57. DOI: 10.1109/ADMInC47948.2019.8969442.
- [17] Nadeen R. Rishani, Raed M. Shubair e Ghadah Aldabbagh. «On the design of wearable and epidermal antennas for emerging medical applications». In: *2017 Sensors Networks Smart and Emerging Technologies (SENSET)*. 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/SENSET.2017.8125046.
- [18] Mourad Roudjane et al. «New Generation Wearable Antenna Based on Multimaterial Fiber for Wireless Communication and Real-Time Breath Detection». In: *Photonics* 5 (ott. 2018), p. 33. DOI: 10.3390/photonics5040033.
- [19] Rita Salvado et al. «Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey». In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 12 (dic. 2012), pp. 15841–57. DOI: 10.3390/s121115841.
- [20] Abu Sadat Md. Sayem et al. «Feasibility Study of PDMS Embedded Transparent Conductive Fabric for the Realization of Transparent Flexible Antennas». In: *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2019, pp. 1–4.
- [21] Hamsapriya Selvaraj. «A new approach to fabricate pdms structures using femtosecond laser». In: *Doctor of Philosophy, 2013 Hamsapriya Selvaraj Department of Aerospace Engineering, Ryerson University*. 2013.
- [22] Zachary J. Silva, Christopher R. Valenta e Gregory D. Durgin. «Design and Characterization of Meshed Microstrip Transmission Lines». In: *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. 2019, pp. 811–814. DOI: 10.1109/MWSYM.2019.8700894.
- [23] Zachary J. Silva, Christopher R. Valenta e Gregory D. Durgin. «Optically Transparent Antennas: A Survey of Transparent Microwave Conductor Performance and Applications». In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 63.1 (2021), pp. 27–39. DOI: 10.1109/MAP.2020.2988526.
- [24] Sankaralinagm Subramaniam et al. «Miniaturization of wearable electro-textile antennas using Minkowski fractal geometry». In: *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. 2014, pp. 309–310. DOI: 10.1109/APS.2014.6904486.
- [25] F. Benabed T. Seghier. «Dielectric Proprietes Determination of High Density Polyethylene (HDPE) by Dielectric Spectroscopy». In: *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 3, No. 2, May 2015*. 2015. DOI: DOI:10.7763/IJMMM.2015.V3.179.
- [26] Jovanche Trajkovikj, Jean-François Zürcher e Anja K. Skrivervik. «PDMS, A Robust Casing for Flexible W-BAN Antennas [EurAAP Corner]». In: *IEEE Antennas and Propagation Magazine* 55.5 (2013), pp. 287–297. DOI: 10.1109/MAP.2013.6735538.
- [27] Jovanche Trajkovikj, Jean-François Zürcher e Anja K. Skrivervik. «Soft and flexible antennas on permittivity adjustable PDMS substrates». In: *2012 Loughborough Antennas Propagation Conference (LAPC)*. 2012, pp. 1–4. DOI: 10.1109/LAPC.2012.6402953.
- [28] Zheyu Wang et al. «Embroidered Conductive Fibers on Polymer Composite for Conformal Antennas». In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 60 (2012), pp. 4141–4147.
- [29] Zhaoqian Xie et al. «Flexible and Stretchable Antennas for Biointegrated Electronics». In: *Advanced Materials* 32.15 (2020), p. 1902767. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201902767>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201902767>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201902767>.
- [30] Peiyi Wu Zhouyue Lei. «A high transparent and ultra-streichable conductor with stable conductivity during large deformation». In: *Nat Commun* 10, 3429 (2019). 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-11364-w.