

# Sobre el reuso de una antena miniatura basada en el fractal Hilbert

Diseño y simulación de una antena orientada a  
aplicaciones IoT en 900 MHz

María Molina Delicado - Trabajo Final del Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Directores: Dr. Jaume Anguera / Dra. Aurora Andújar

Fecha de la defensa: 05/07/2023

# Índice de contenido

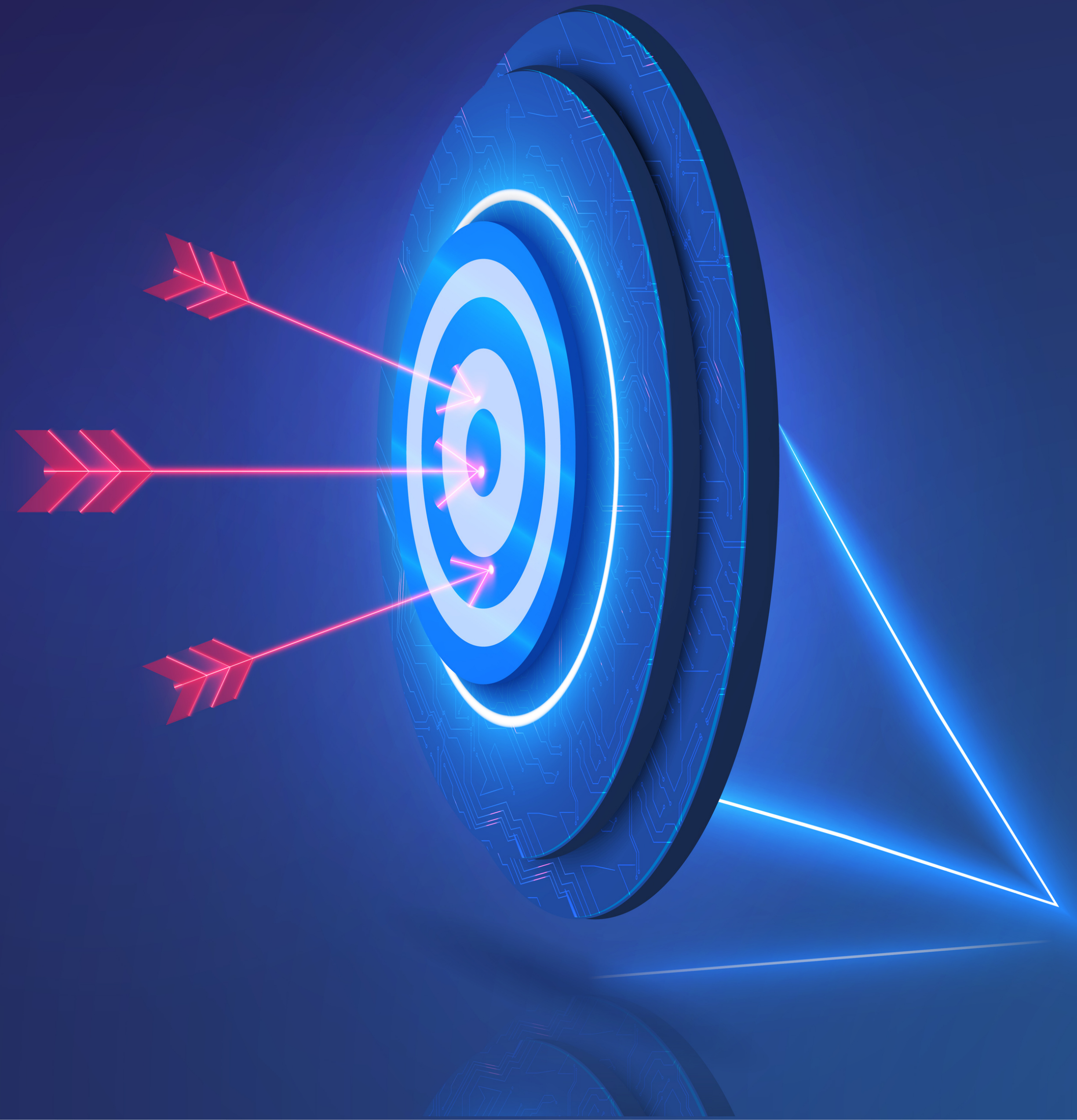
## Secciones de la presentación

1. **Introducción:** Objetivos, marco teórico, metodología y planificación
2. **Diseño y simulación:** Procedimiento en HFSS del diseño y simulación de las antenas Hilbert propuestas
3. **Reusabilidad:** Estudio sobre la reusabilidad de la antena en términos de adaptación, eficiencia, ganancia y directividad
4. **Conclusiones:** Resultados obtenidos, objetivos conseguidos y propuestas de trabajo futuro

**Nota:** Todas las imágenes utilizadas en la presentación han sido obtenidas legalmente a través de Adobe Stock

# Objetivos

- ✱ Estudio de trabajos previos sobre el diseño de antenas miniaturizadas y concretamente antenas Hilbert
- ✱ Realización de diferentes modelos y comparación de los mismos
- ✱ Estudio de la influencia de la longitud de la curva
- ✱ Estudio de la adaptación de impedancias
- ✱ Estudio exhaustivo de la influencia del tamaño del plano de masa
- ✱ Estudio de la reusabilidad del diseño
- ✱ Comparativa con otros diseños de antenas miniaturizadas



# Marco teórico

## Reglas de diseño utilizadas en trabajos anteriores

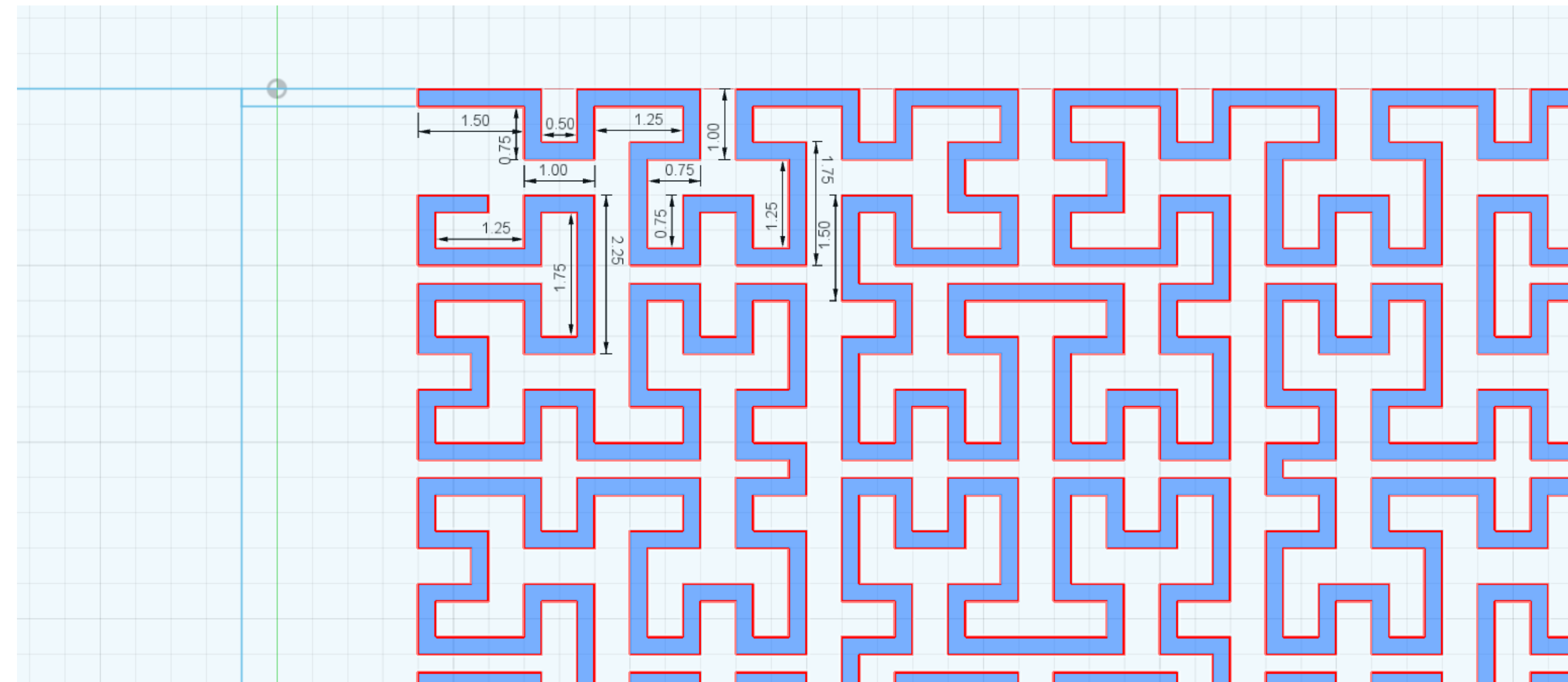
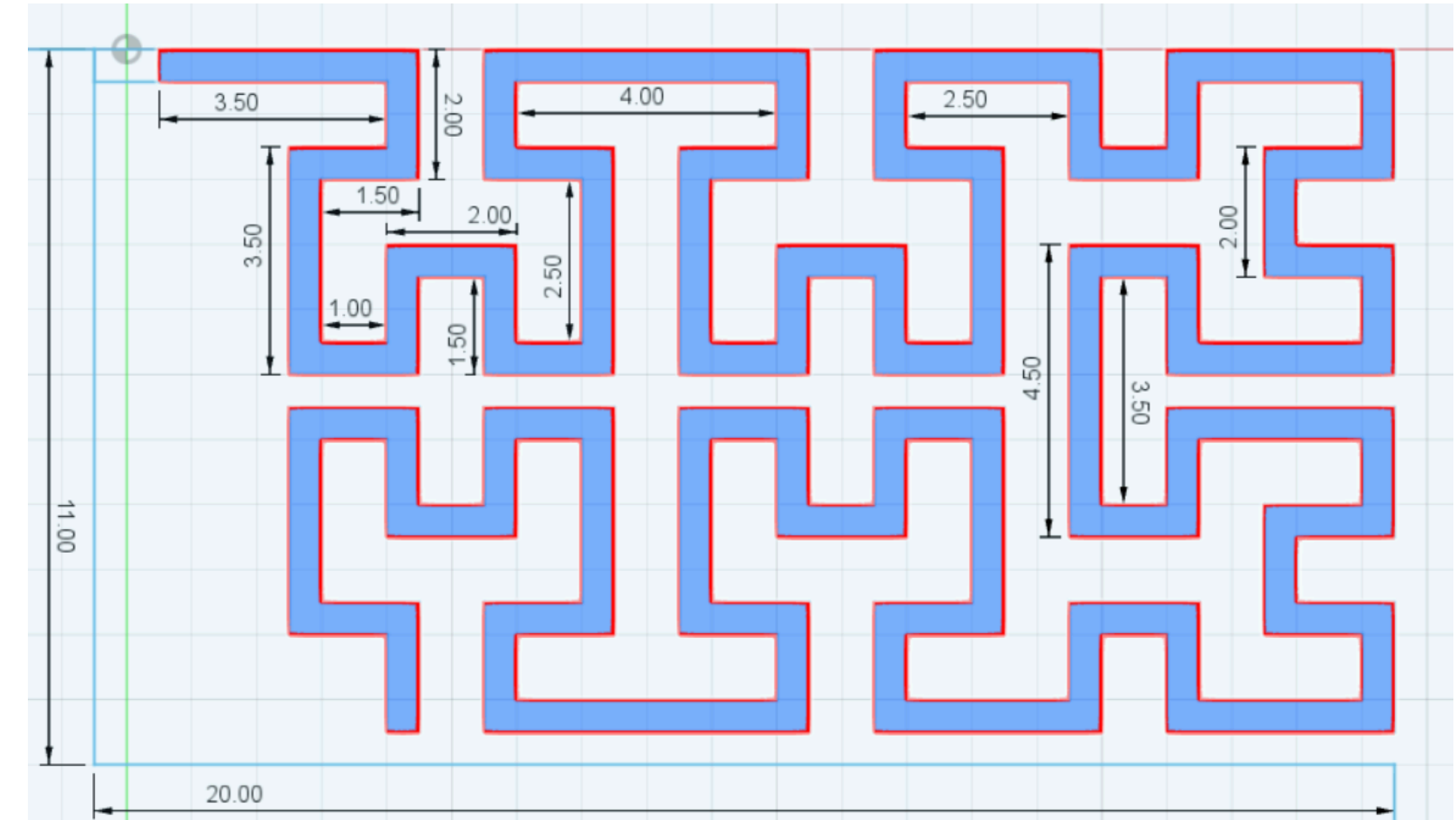
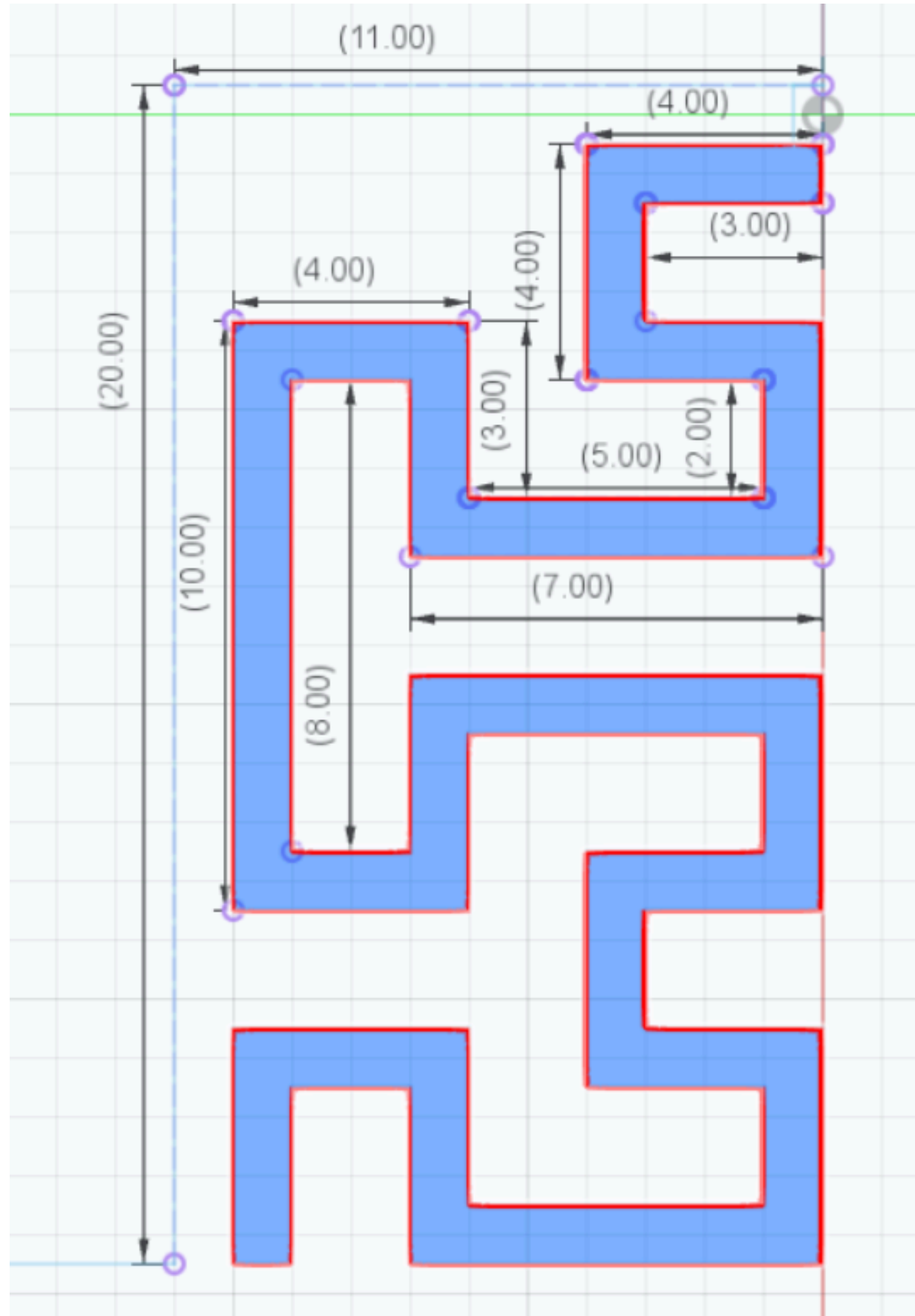
Para el cálculo de las dimensiones  $d$  de cada fragmento de línea del fractal, partiendo de una determinada longitud del lado  $L$  o de la suma total de todos los fragmentos  $S$ , siendo  $n$  el orden de iteración del fractal:

$$d = \frac{L}{2^n - 1} \quad S = (2^n - 1)d = (2^n + 1)L$$

Para el cálculo del ancho de la pista para un determinado grosor y constante dieléctrica del sustrato y una impedancia característica  $Z_0$

$$A = \left( \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \right) + \left( \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad w = \frac{8he^A}{e^{2A} - 2}$$

# Dimensiones de los órdenes 2, 3 y 4



# Metodología

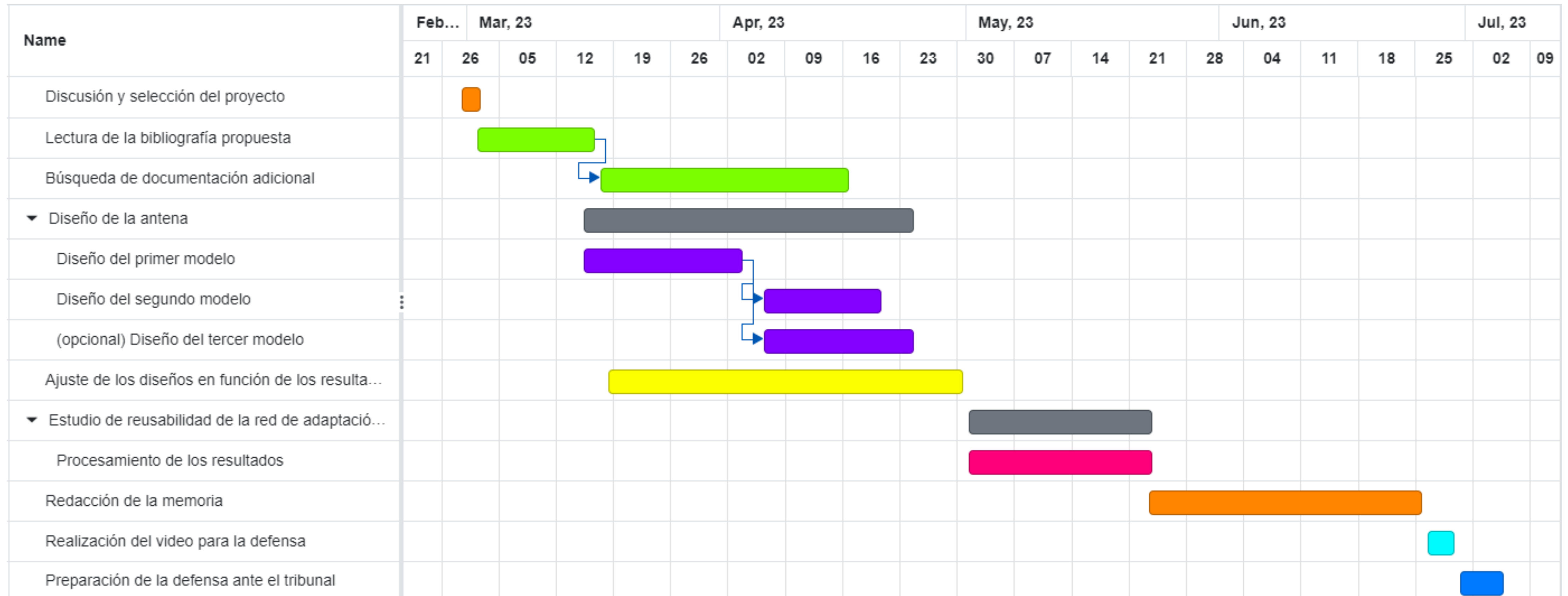
## Diseño y simulación

- ✱ Para el diseño 3D y la simulación electromagnética se ha utilizado la plataforma Ansys Electronics Desktop 2020 R2, concretamente las herramientas HFSS Design y HFSS Circuit
- ✱ El diseño y simulación electromagnética iniciales se realizan en HFSS, y la co-simulación incluyendo la red de adaptación de elementos concentrados en HFSS Circuit
- ✱ Para la automatización de la exportación de los archivos .s2p y el post-procesado de todos los datos generados se ha utilizado el lenguaje de programación Python, con paquetes como IronPython o Scikit-RF



# Planificación

## Diagrama de Gantt estimado



# Diseño y simulación en HFSS

Gráficas generadas con AWR Microwave Office

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x,t)}{\partial x^2} + U(x) \Psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x,t)}{\partial t}$$

$$\mathbf{P} = (E/c, \mathbf{p})$$

$$\mathbf{K} = (\omega/c, \mathbf{k})$$

$$E$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\hbar = h/2\pi$$

$$\hat{H} = \sum_{n=1}^N \frac{p_n^2}{2m_n} + V(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

$$(E - q\phi)^2 - (pc - qA)^2 = (mc^2)^2$$

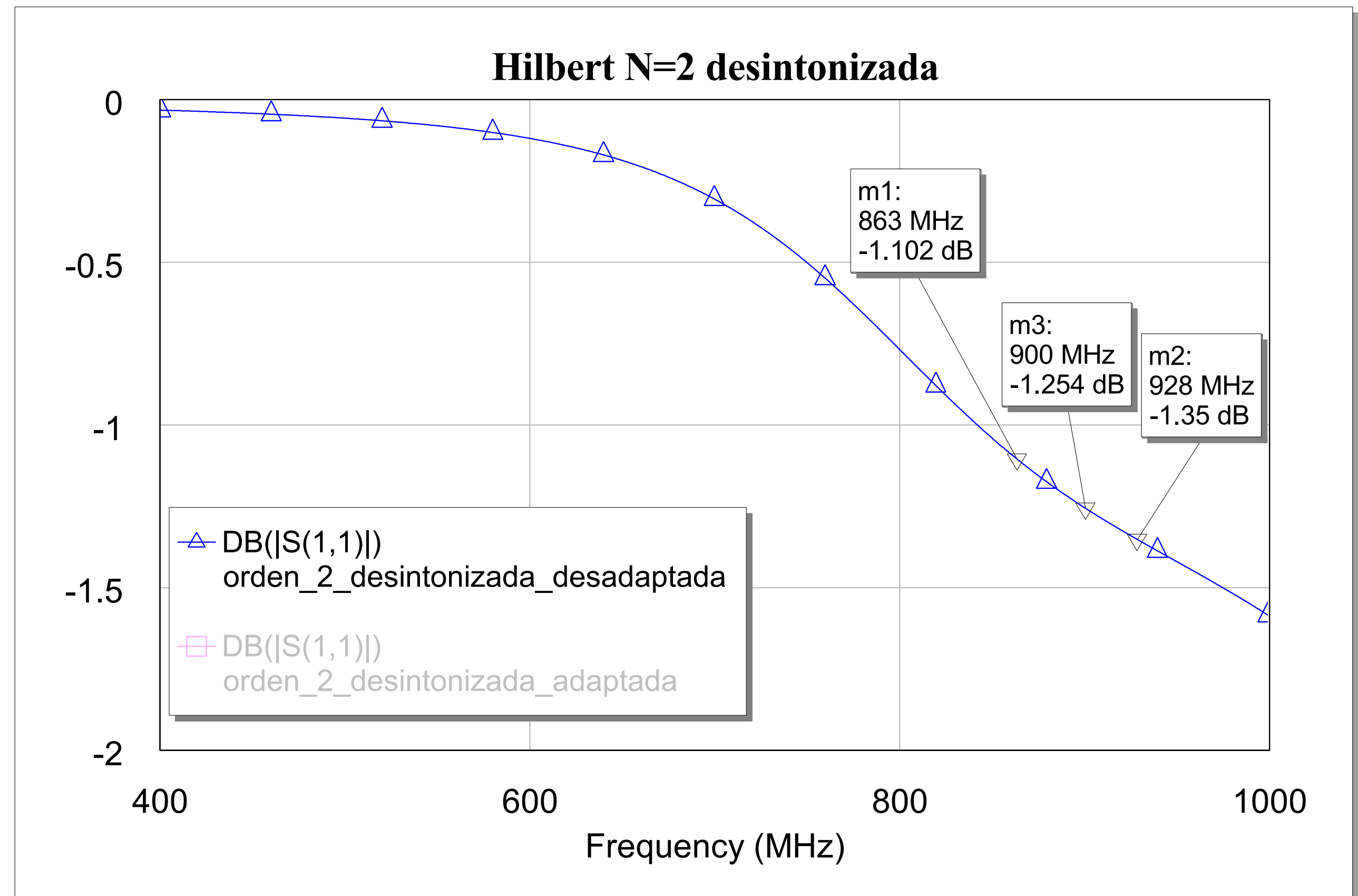
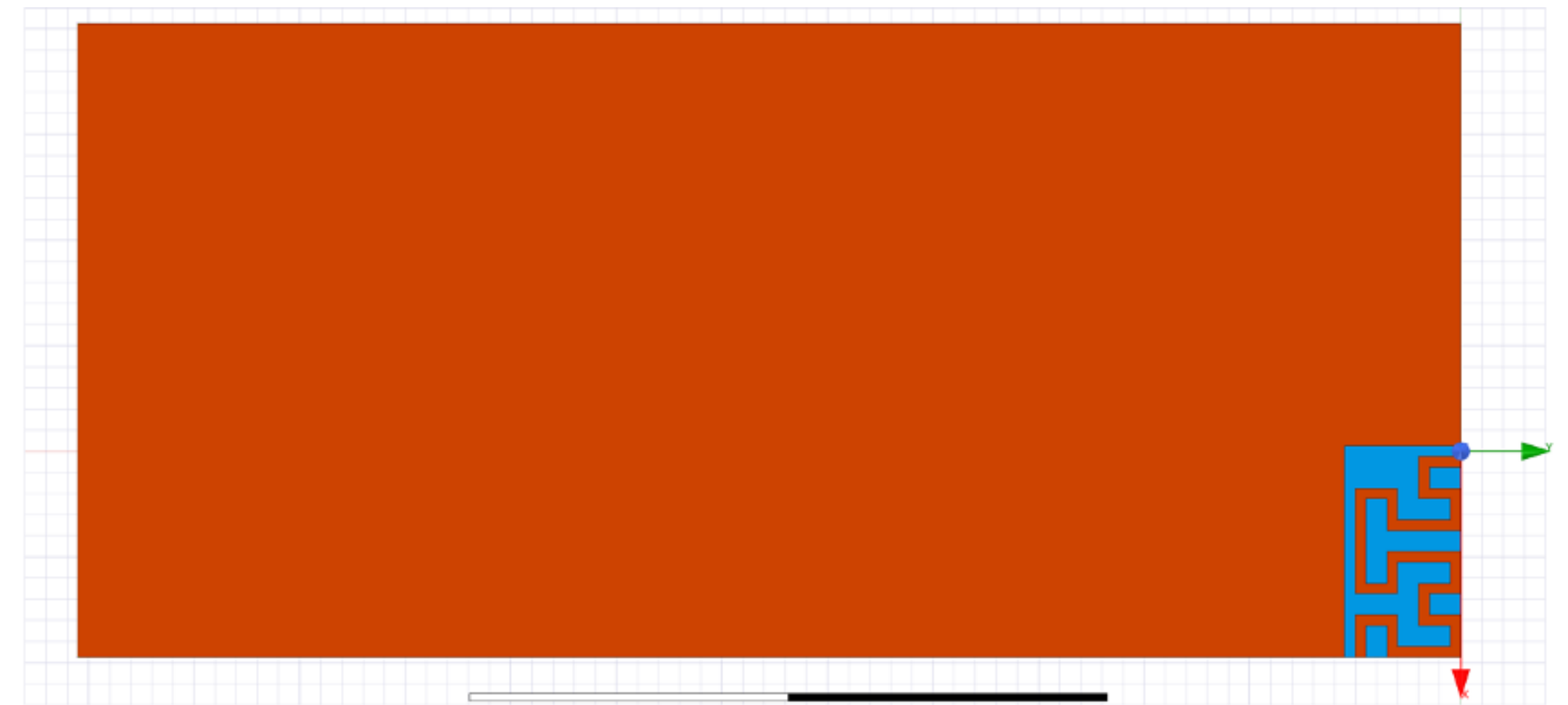
$$\Psi^*(x,t) \Psi(x,t)$$



# Diseño y simulación (I)

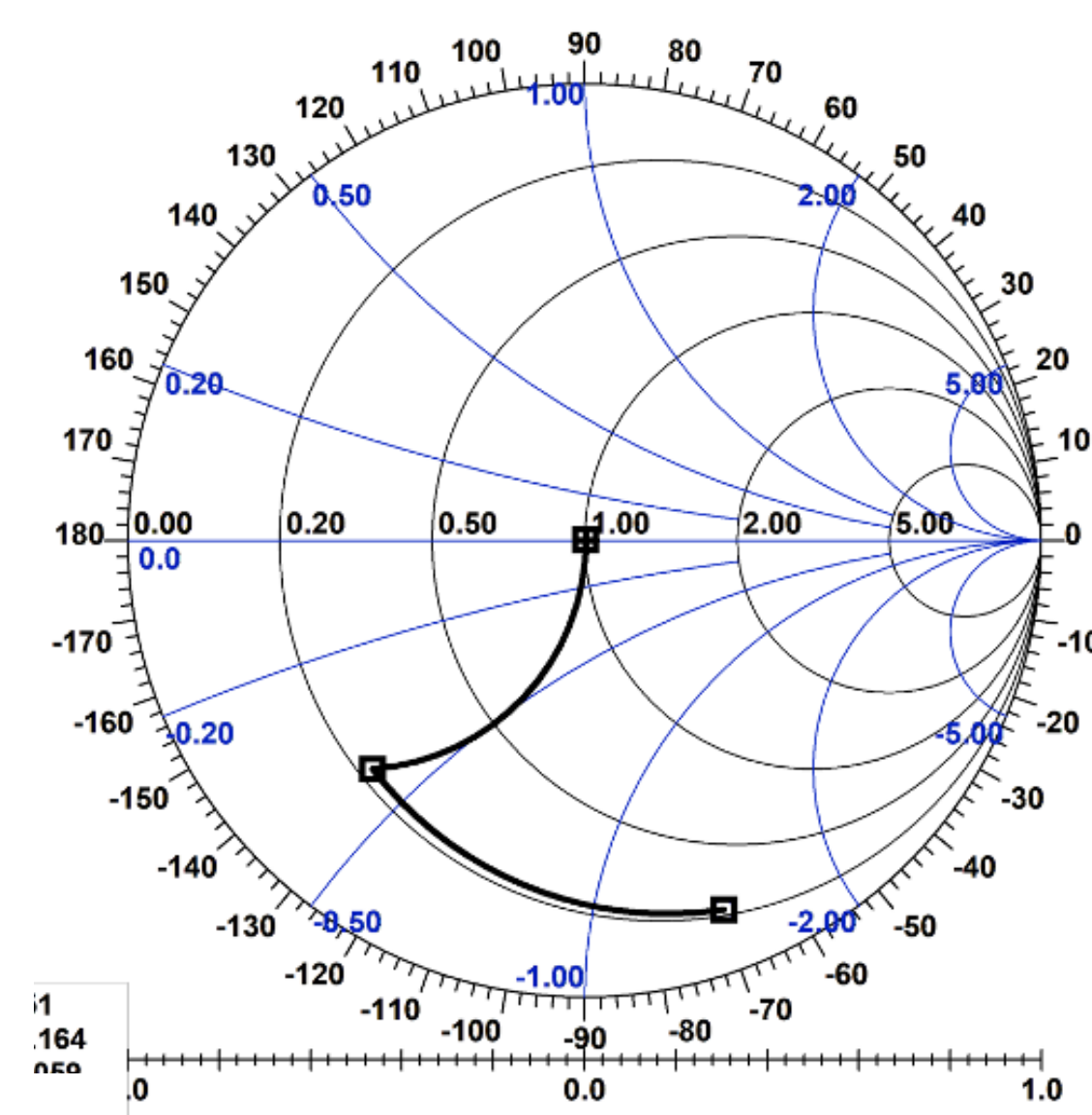
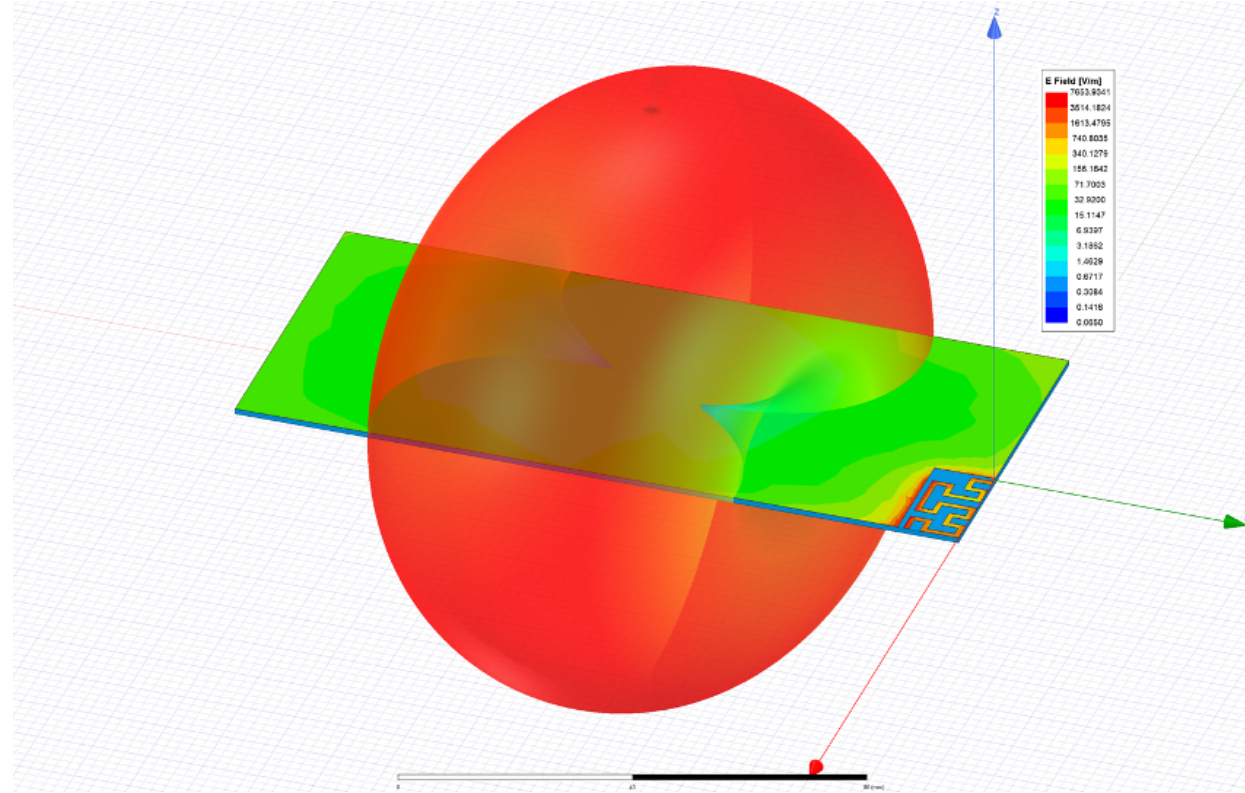
## Antena Hilbert N = 2 (I)

- ✱ Muy desadaptada a las frecuencias de interés
- ✱ Es necesario diseñar una red de adaptación a 900 MHz

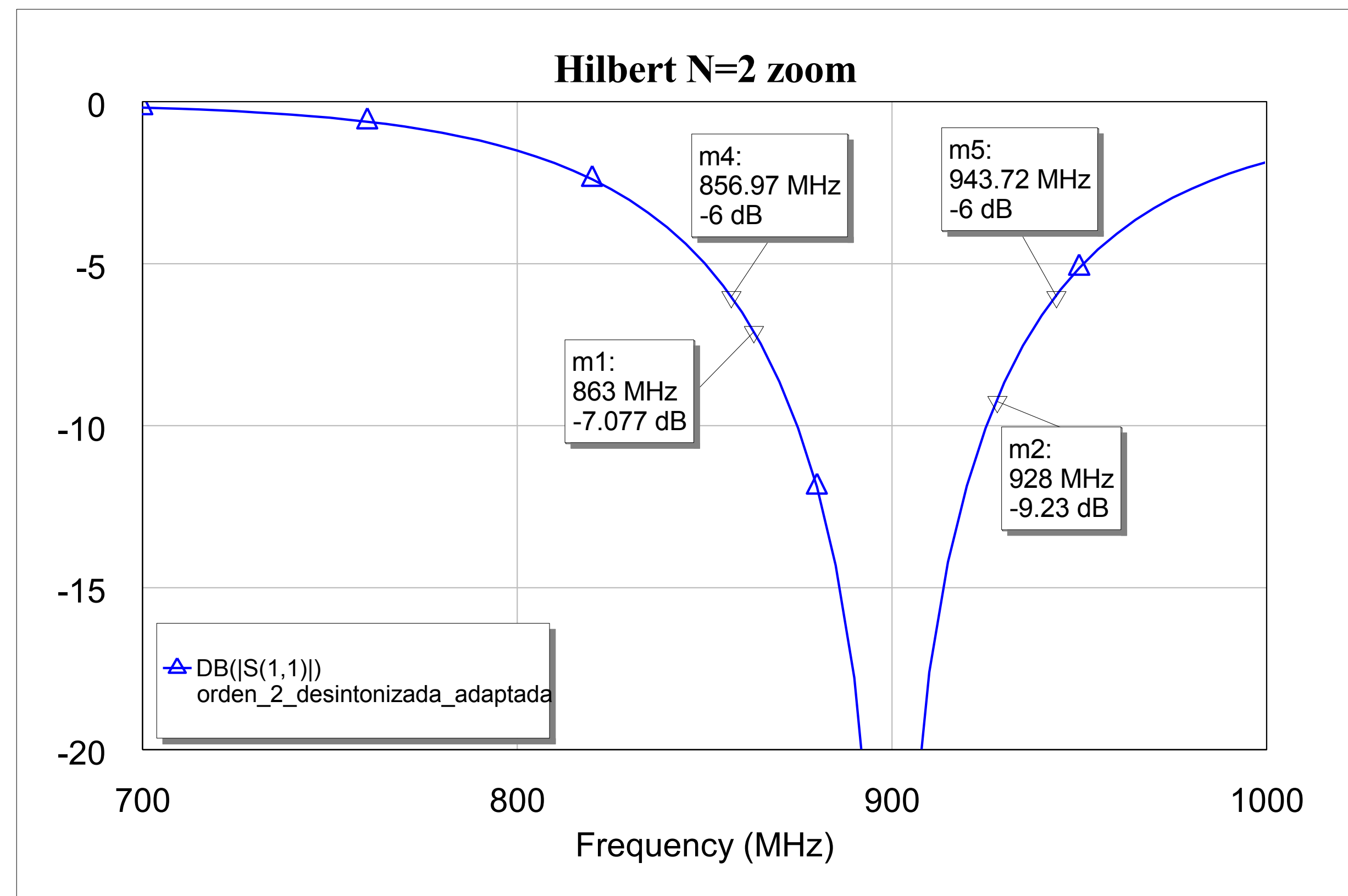


# Diseño y simulación (II)

## Antena Hilbert N = 2 (II)

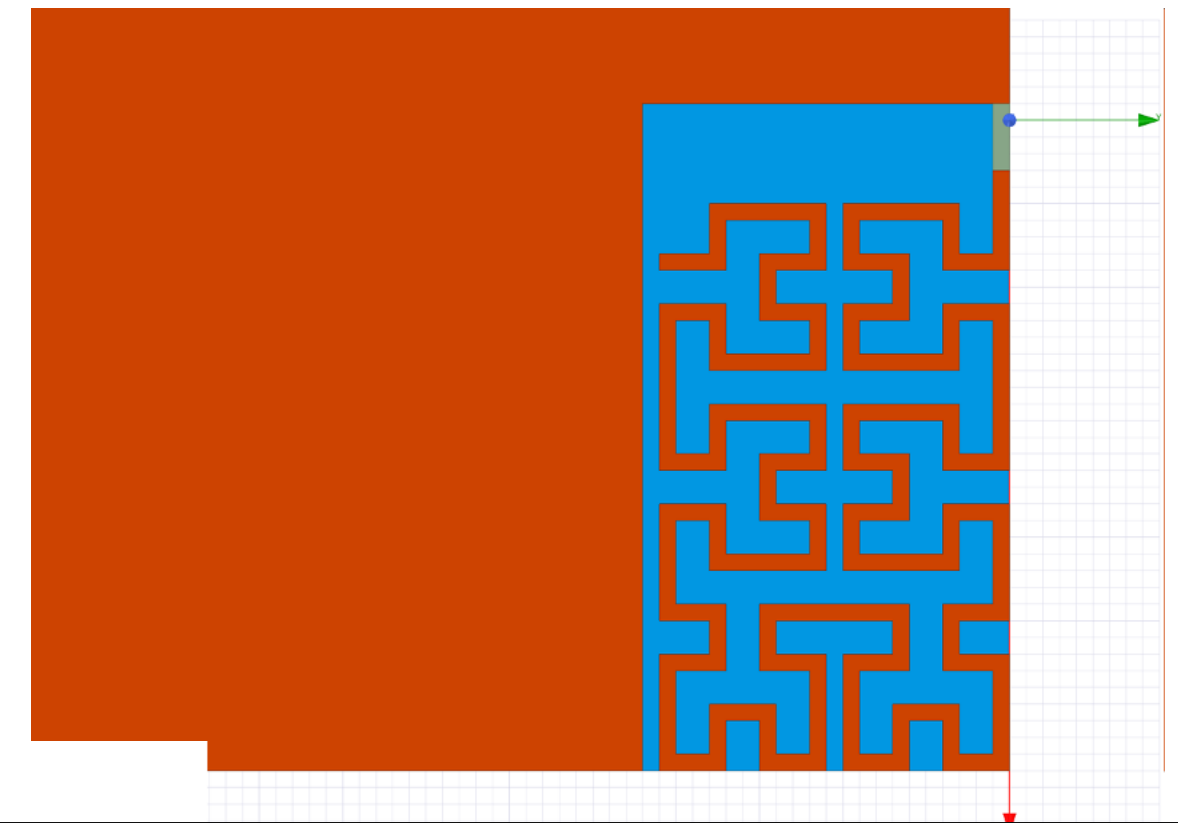


- ✱ Se diseña la red de adaptación mediante HFSS Smith Tool
- ✱ Red de elementos concentrados:  
L serie 8.88 nH + L paralelo 4.75 nH
- ✱ BW relativo: 9.64 %
- ✱ Adaptación a 900 MHz: -42.24 dB
- ✱ Eficiencia de radiación a 900 MHz: 92.75%

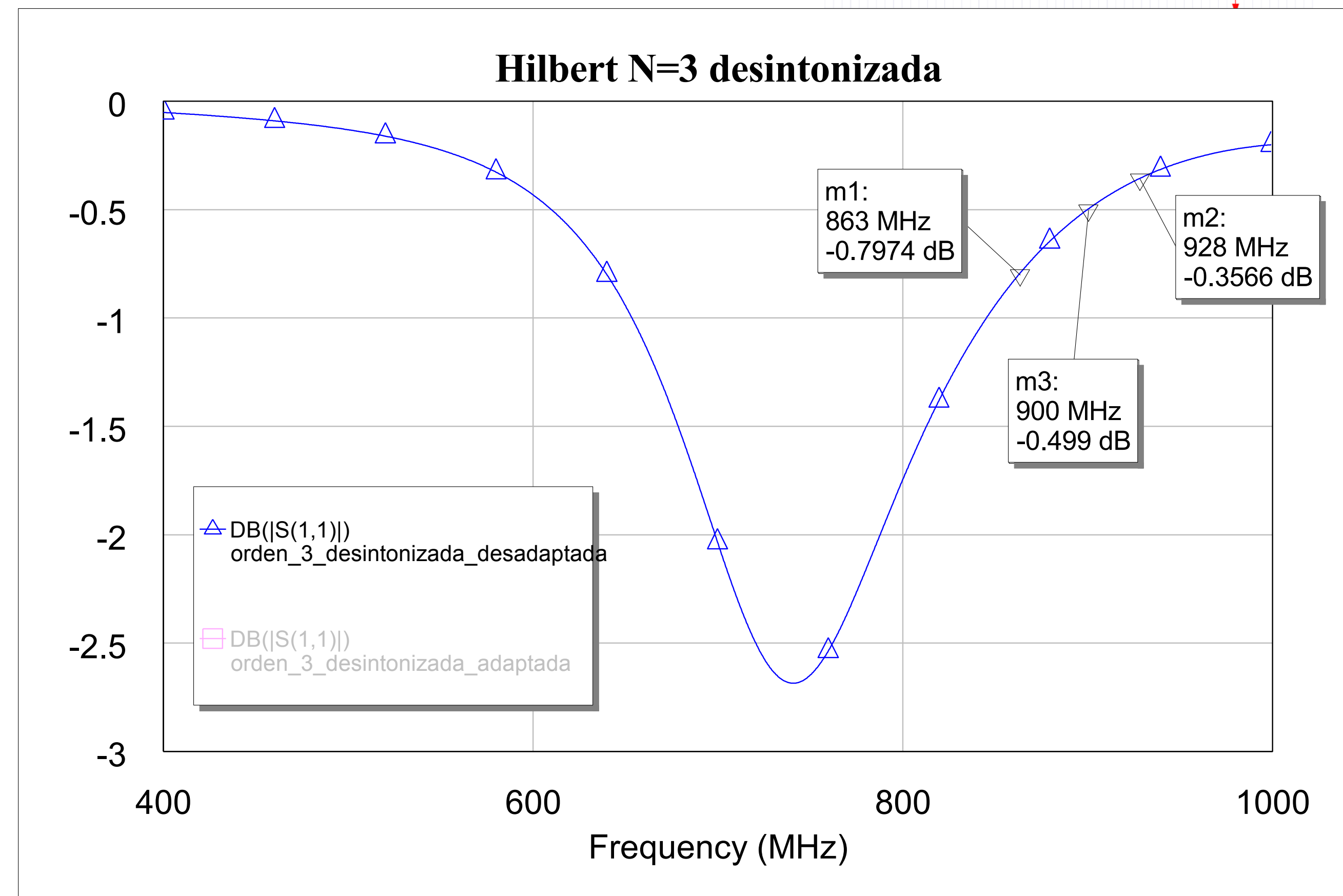


# Diseño y simulación (III)

## Antena Hilbert N = 3 (I)



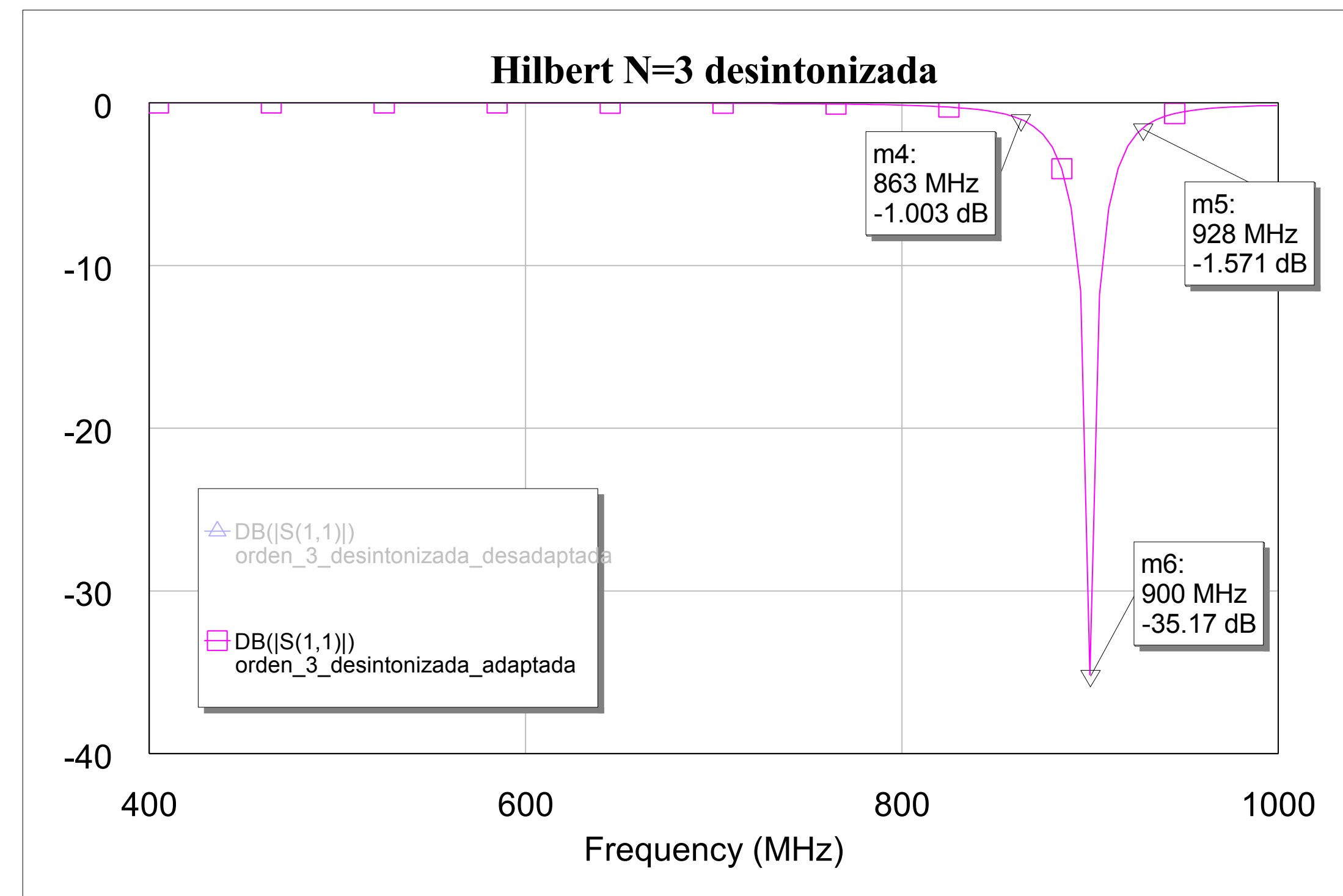
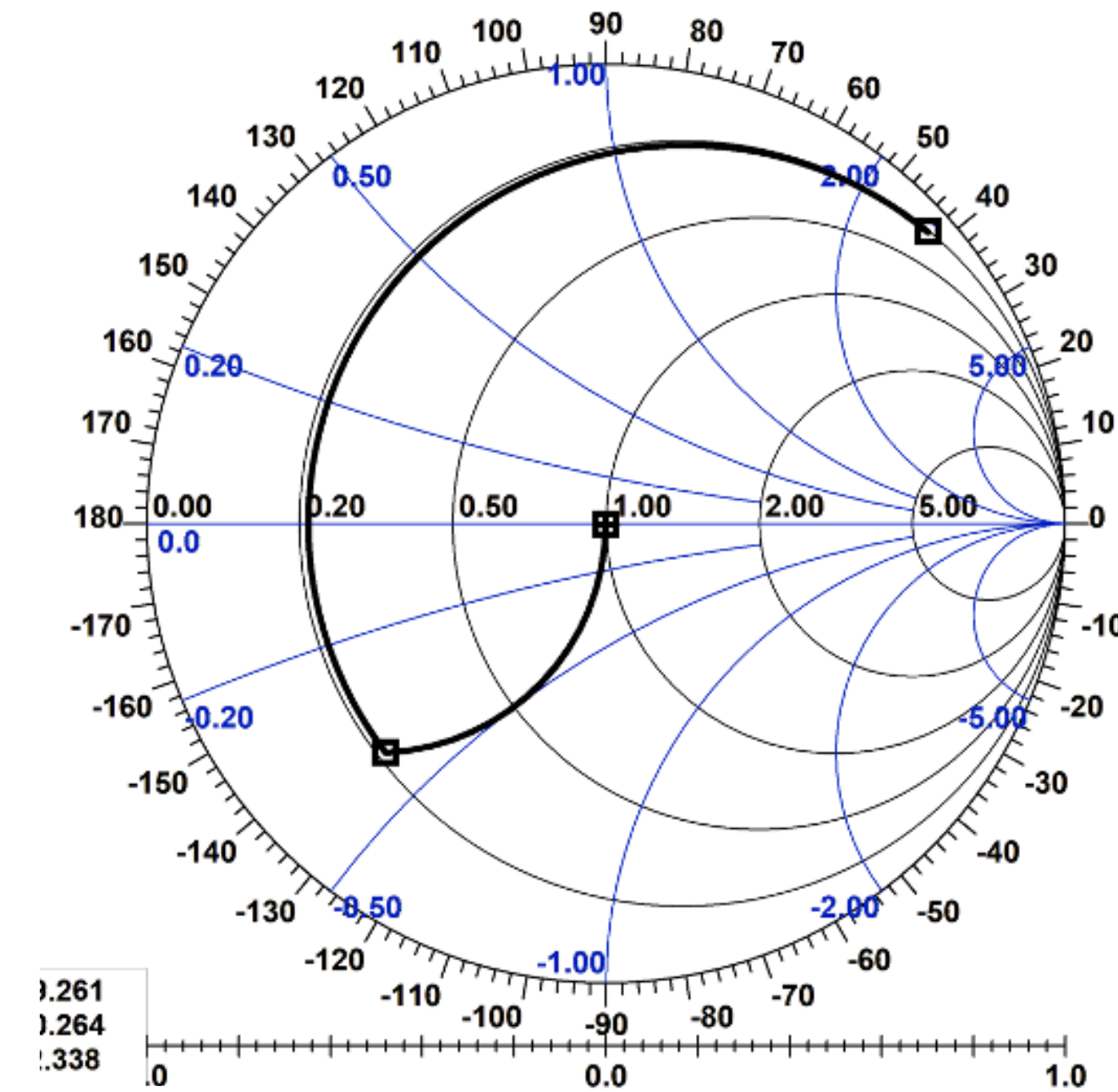
- ✱ No está adaptada ni sintonizada a 900 MHz
- ✱ Es necesario implementar una red de adaptación igual que en el caso anterior



# Diseño y simulación (IV)

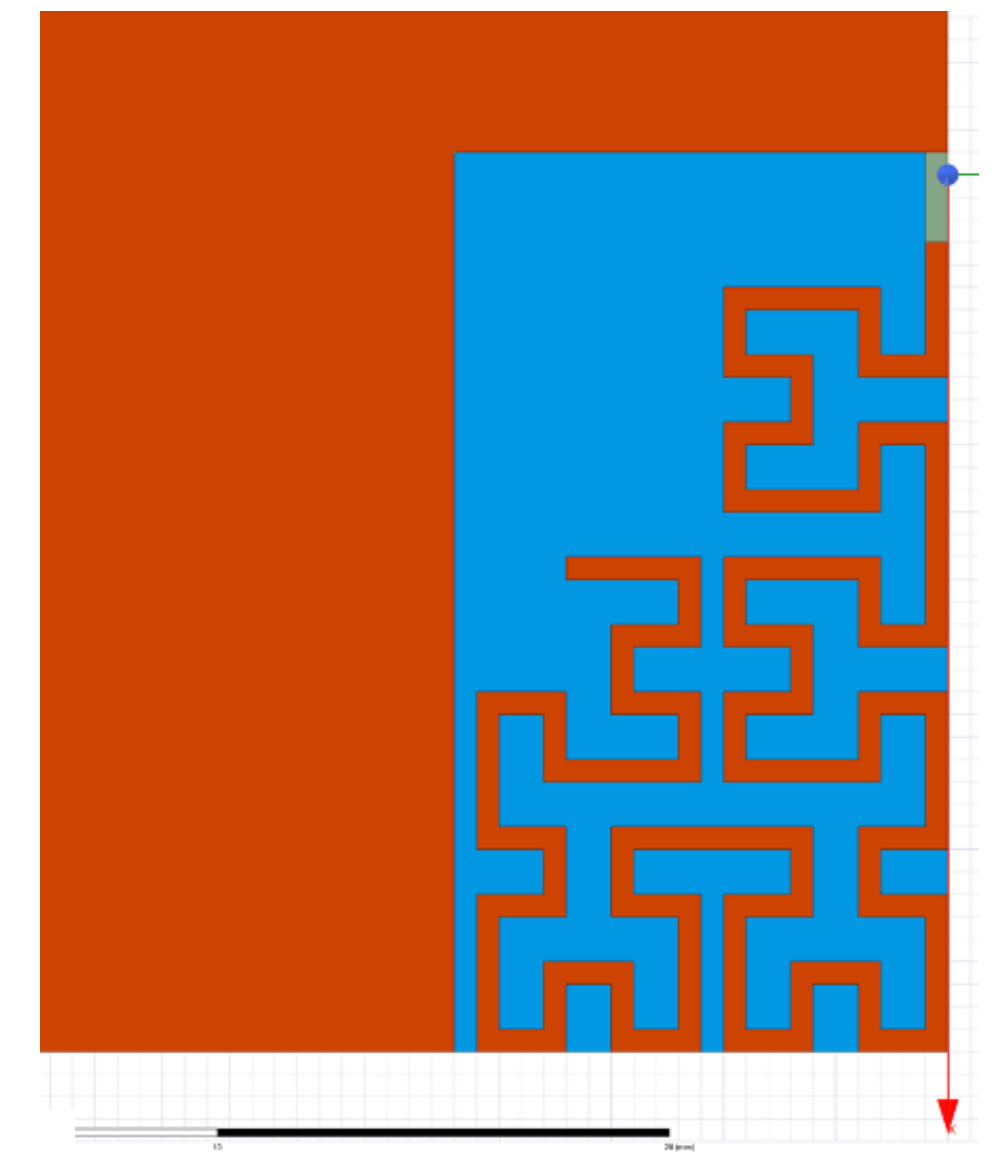
## Antena Hilbert N = 3 (II)

- ✱ Red de elementos concentrados:  
C serie 1.18 pF + L paralelo 4.62 nH
- ✱ BW relativo: 2.44 %
- ✱ Adaptación a 900 MHz: -35.17 dB

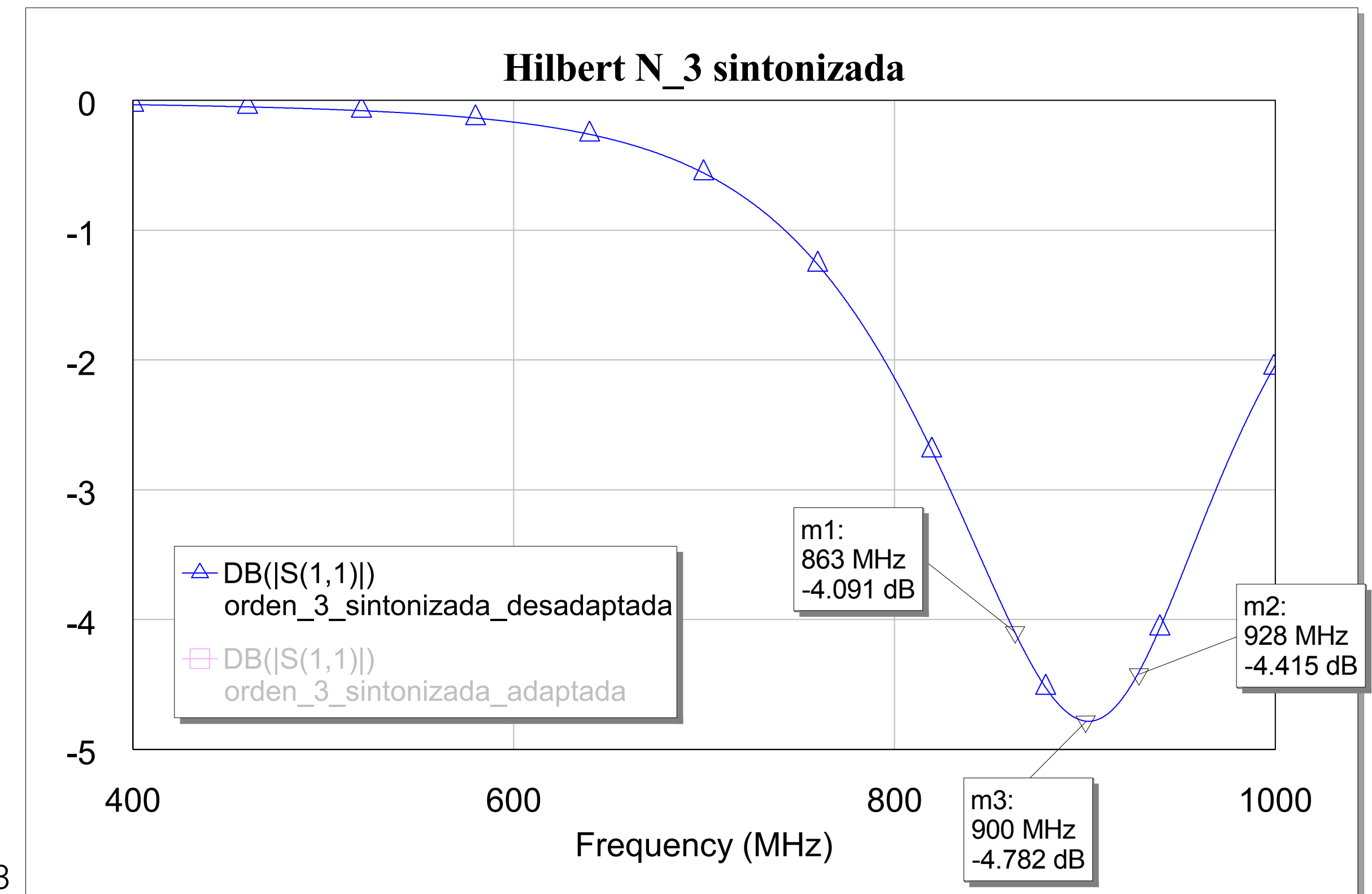


# Diseño y simulación (VI)

## Antena Hilbert N = 3 (III)

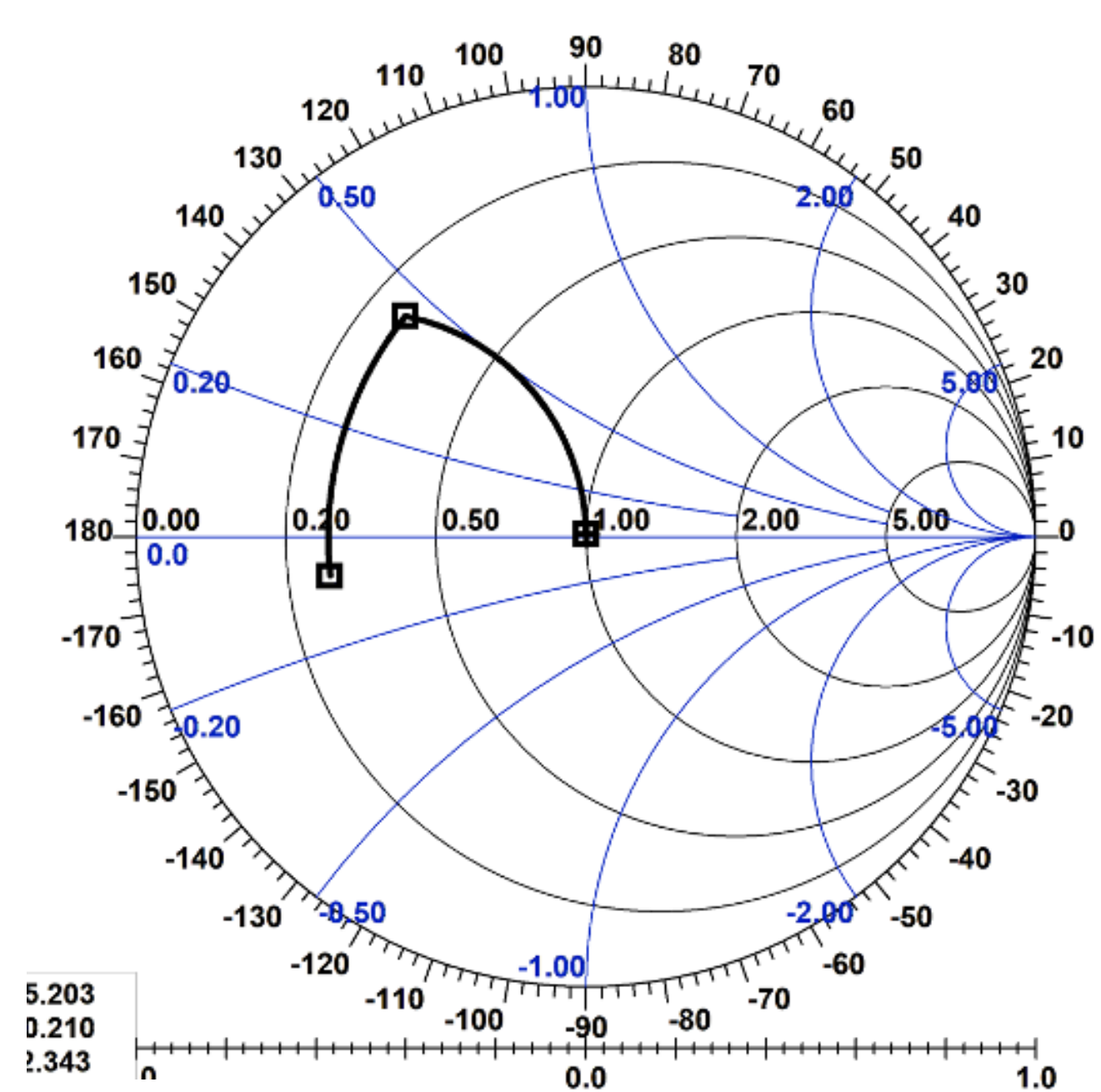


- ✱ Al igual que ya se había verificado en trabajos anteriores, la longitud de la curva influye en la frecuencia de operación de la antena
- ✱ Para sintonizarla a frecuencias superiores es necesario acortarla
- ✱ La antena ya se encuentra sintonizada a 900 MHz pero sigue necesitando una red de adaptación

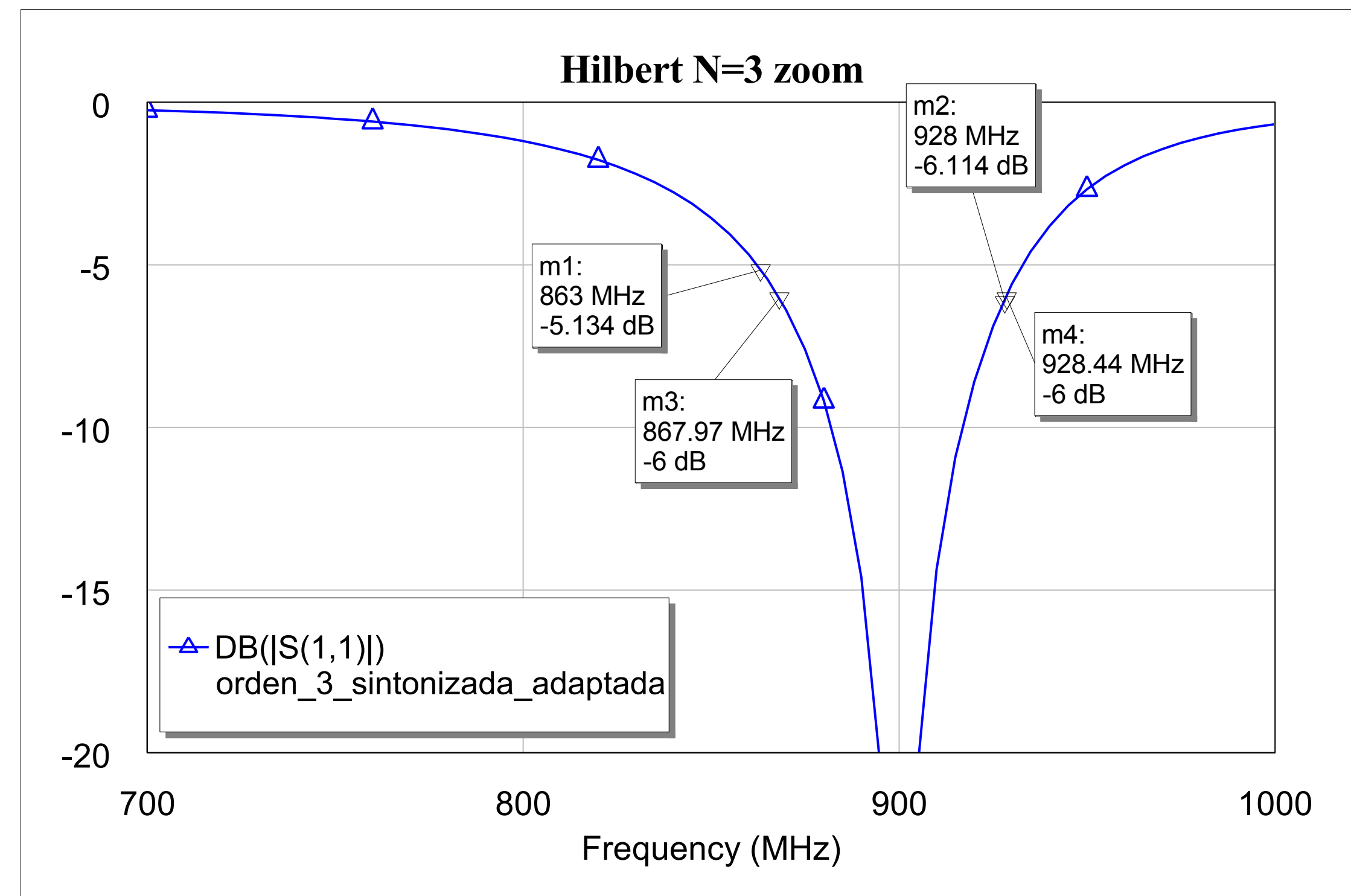


# Diseño y simulación (VII)

## Antena Hilbert N = 3 (IV)

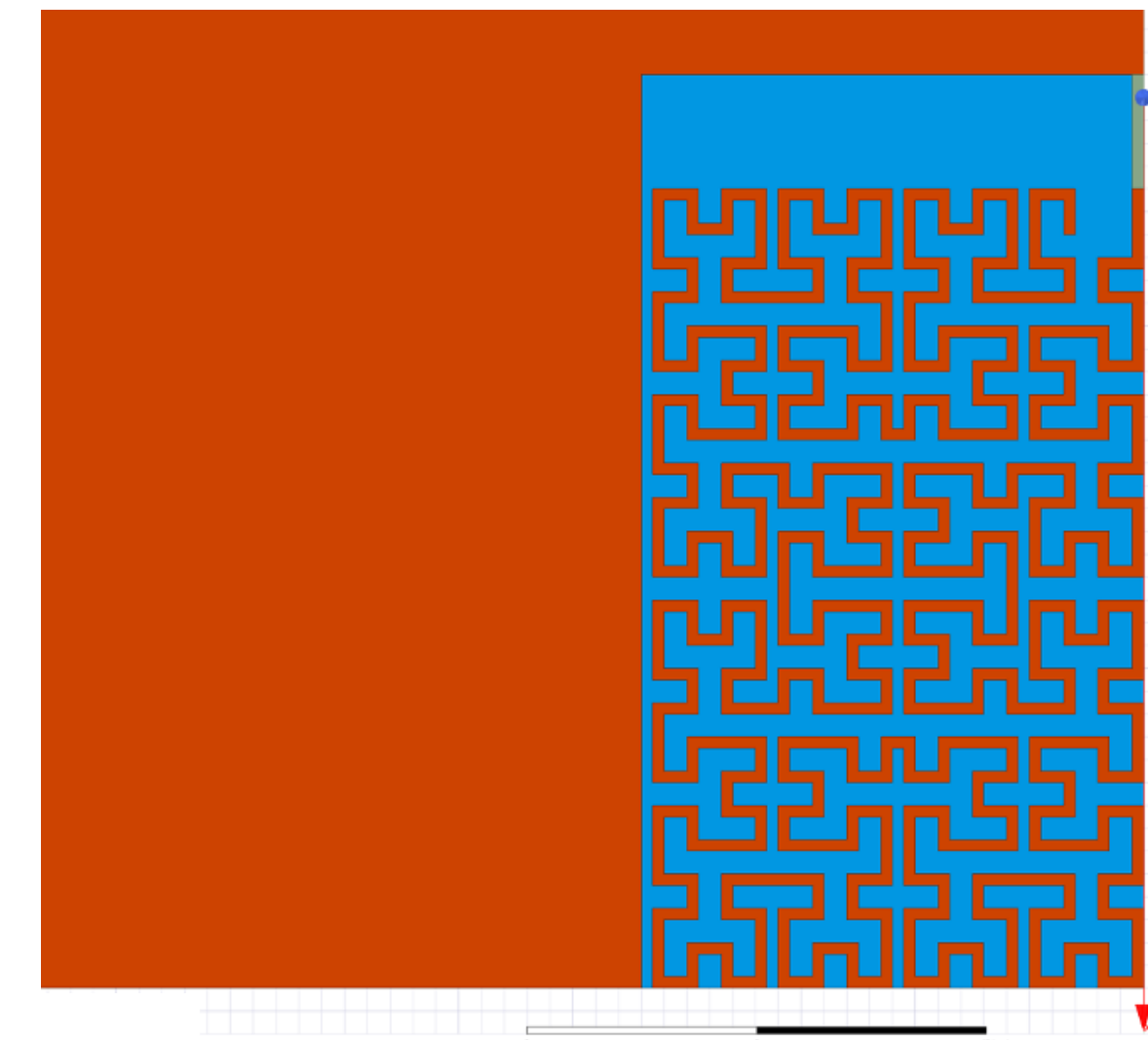


- ✱ Red de elementos concentrados:  
L serie 4.56 nH + C paralelo 5.75 pF
- ✱ BW relativo: 6.77 %
- ✱ Adaptación a 900 MHz: -41.45 dB
- ✱ Eficiencia de radiación a 900 MHz: 77.85%
- ✱ Mejora notable del BW relativo y también de la adaptación a 900 MHz respecto a la desadaptada

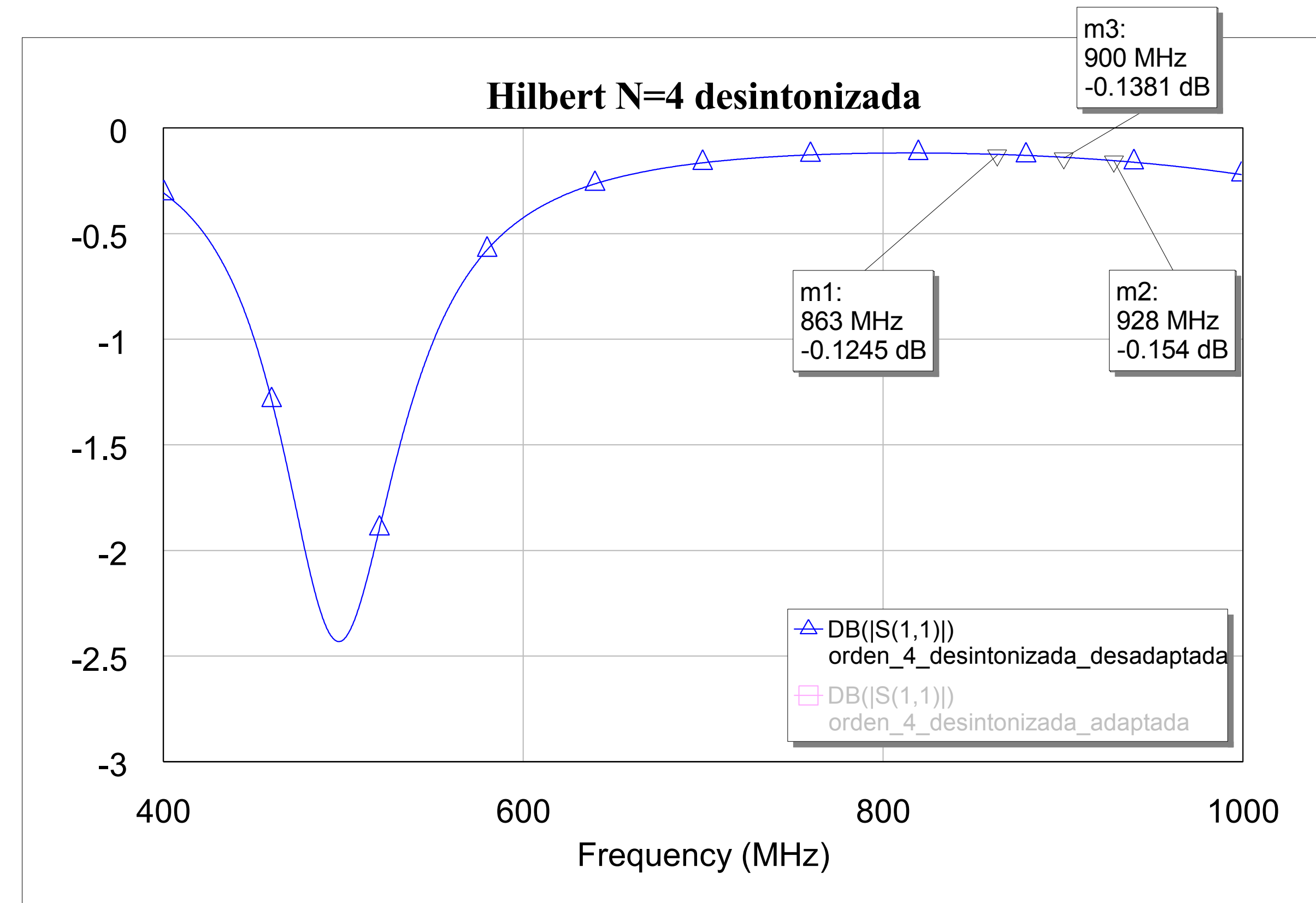


# Diseño y simulación (VIII)

## Antena Hilbert N = 4 (I)



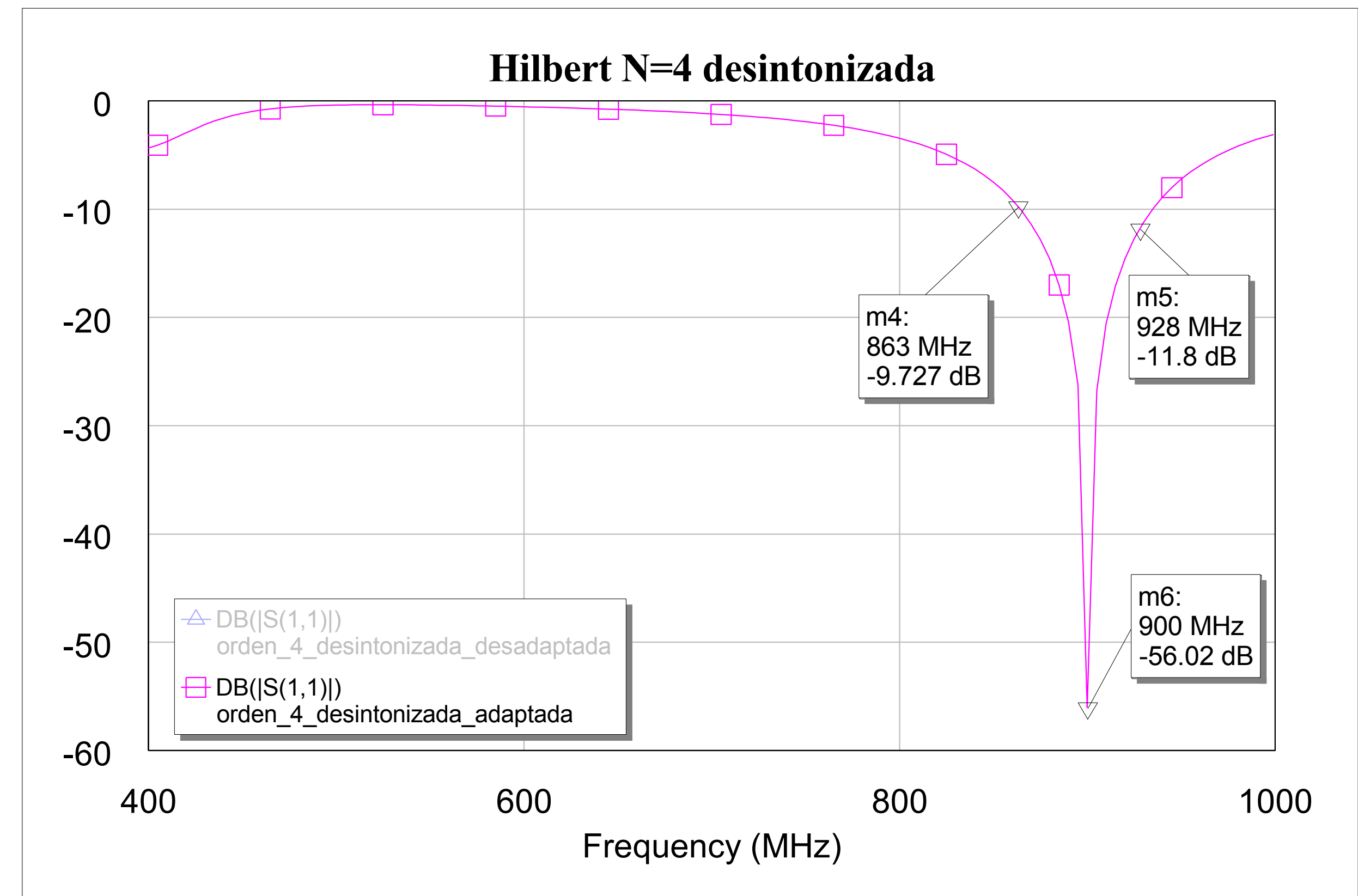
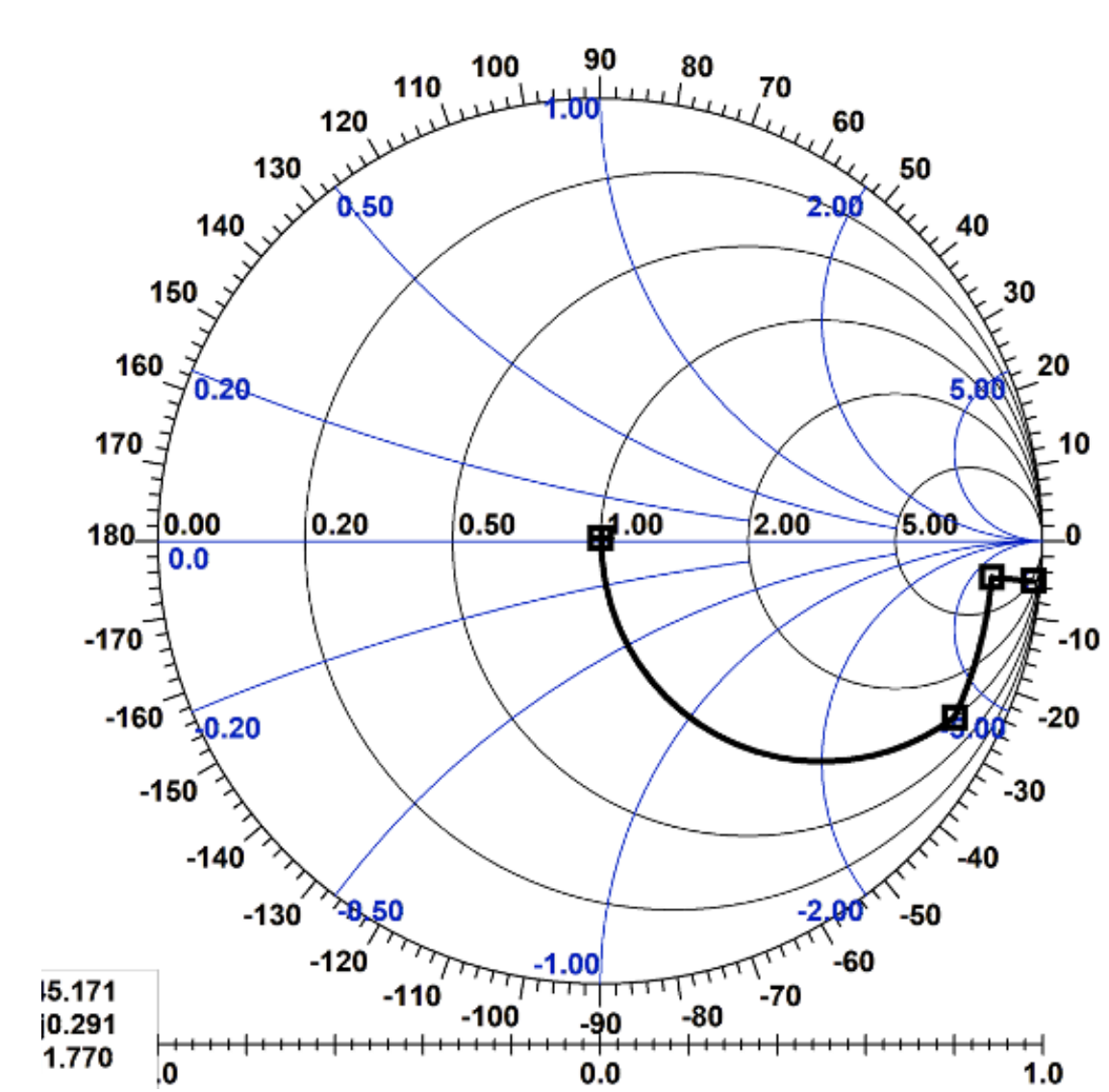
- ✱ No está adaptada ni sintonizada a 900 MHz
- ✱ El aumento del largo del fractal ha bajado notablemente la frecuencia de operación, aunque sigue estando desadaptada
- ✱ También necesario implementar una red de adaptación



# Diseño y simulación (IX)

## Antena Hilbert N = 4 (II)

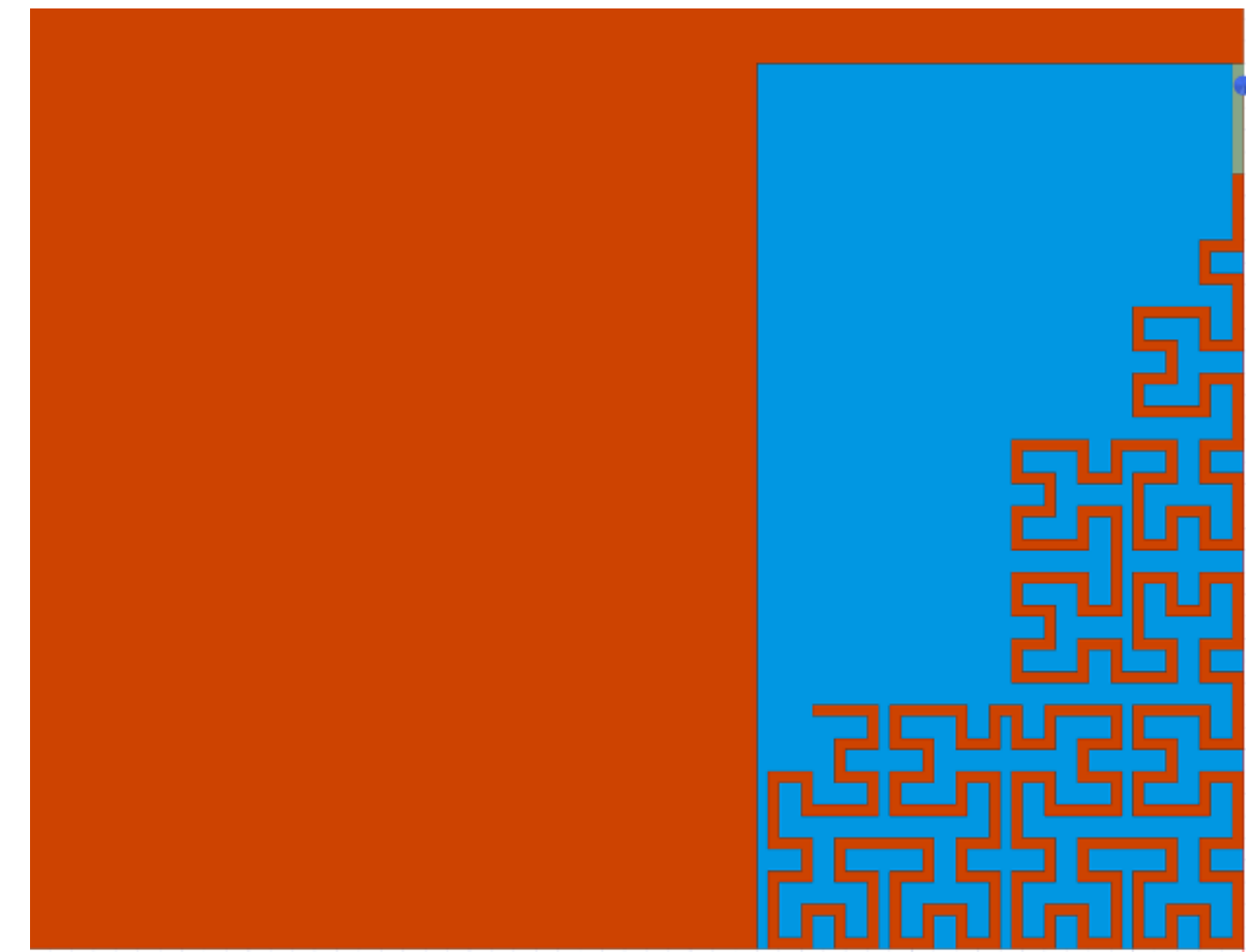
- ✱ Impedancia similar al circuito abierto en 900 MHz
- ✱ Se requiere una resistencia en la red de elementos concentrados:  
R serie 1 kOhm + C paralelo 0.67pF + L serie 35.65 nH
- ✱ Desaconsejable debido a la disipación de potencia
- ✱ BW relativo: 13.47 %
- ✱ Adaptación a 900 MHz: -56.02 dB
- ✱ Eficiencia de radiación a 900 MHz: 92.75%



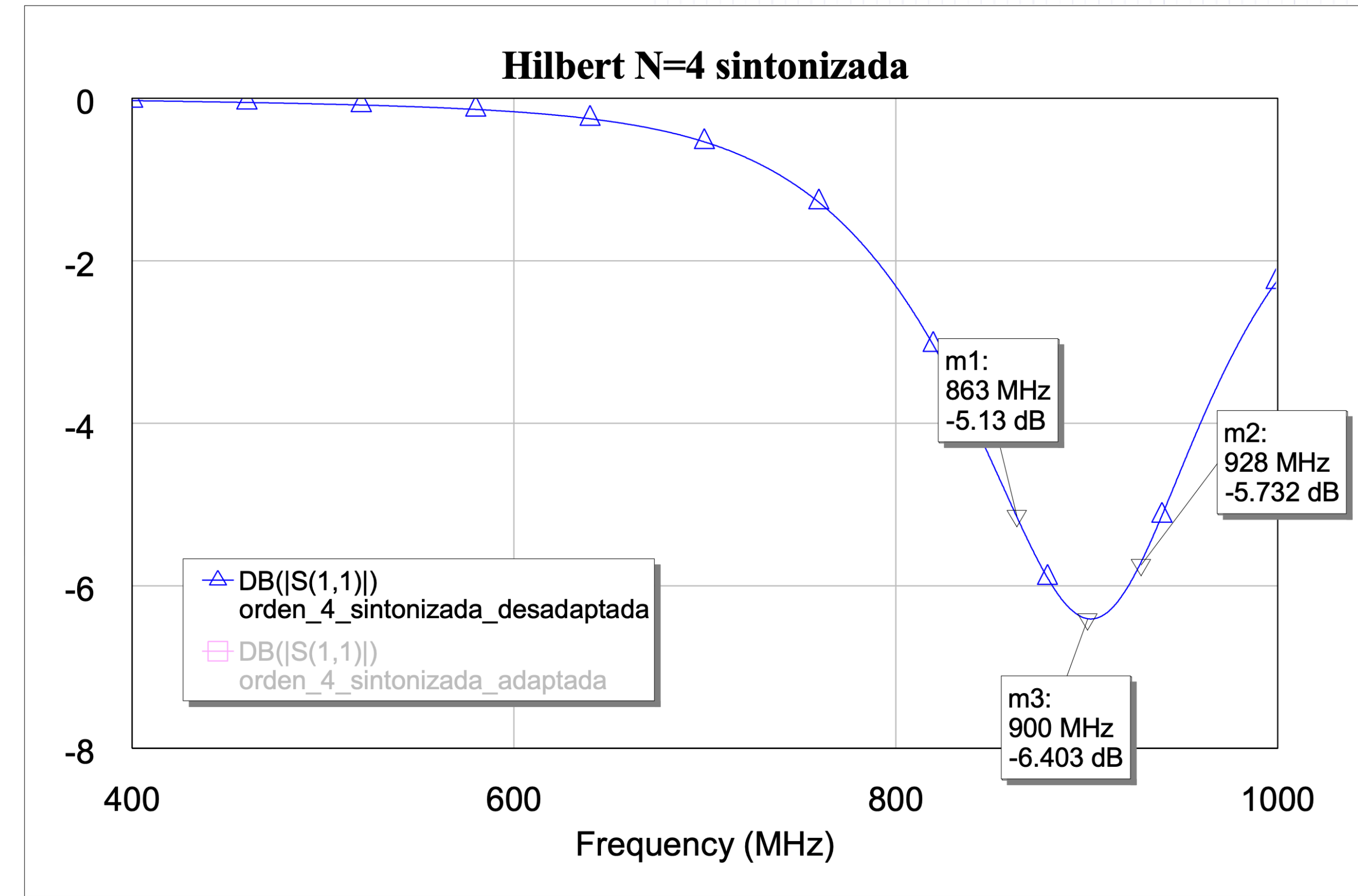


# Diseño y simulación (X)

## Antena Hilbert N = 4 (III)

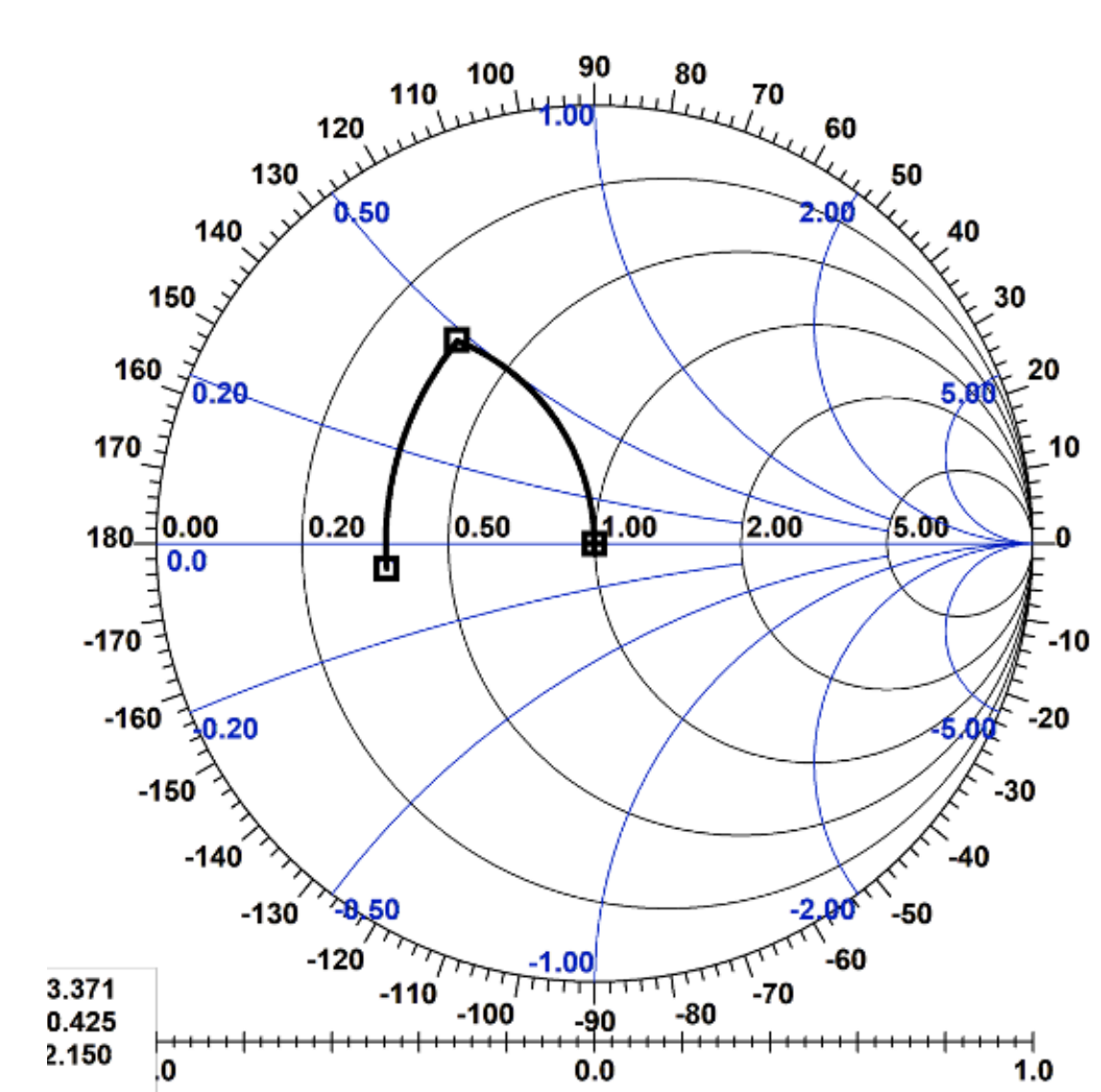
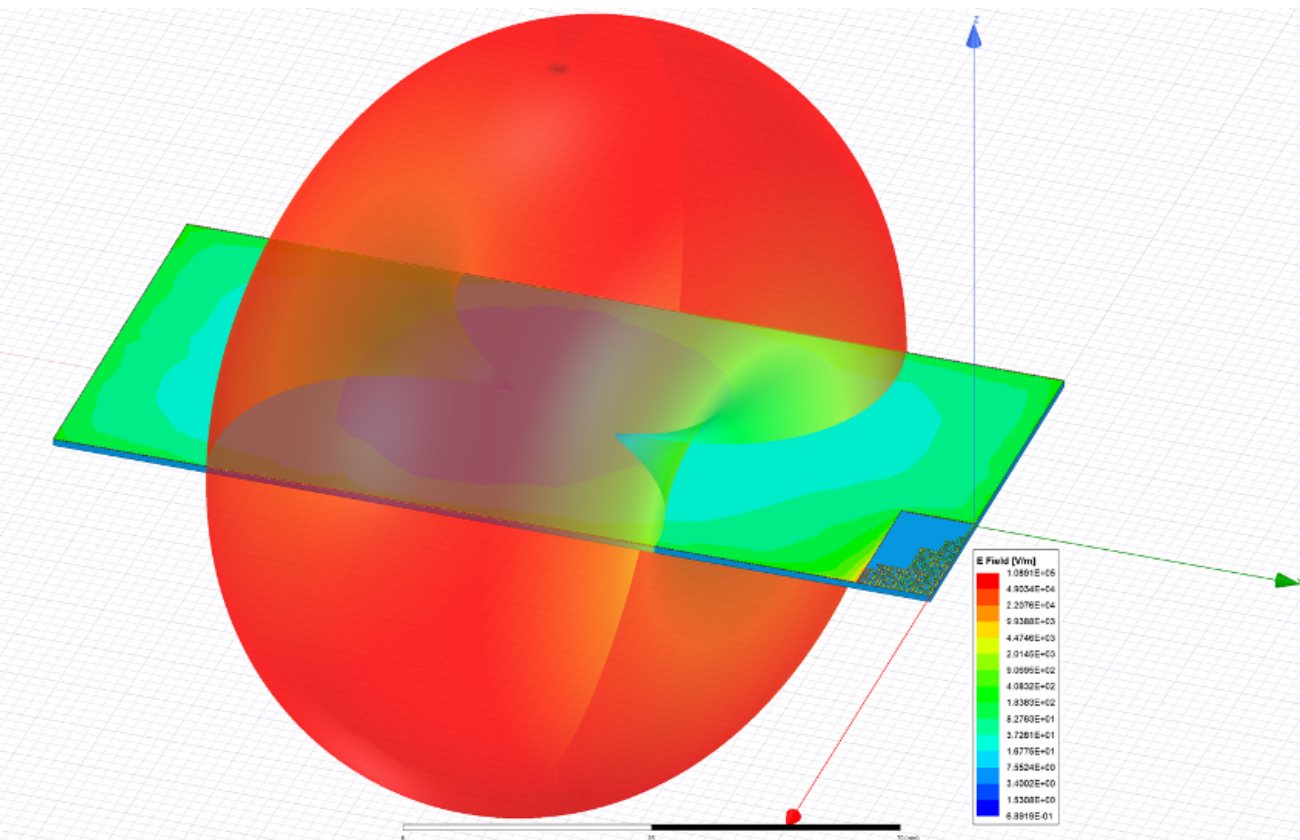


- ✱ Se acorta la línea y se sintoniza a 900 MHz
- ✱ Aunque ha mejorado respecto a la versión anterior, sigue sin tener unos valores de S11 aceptables
- ✱ También necesario implementar una red de adaptación

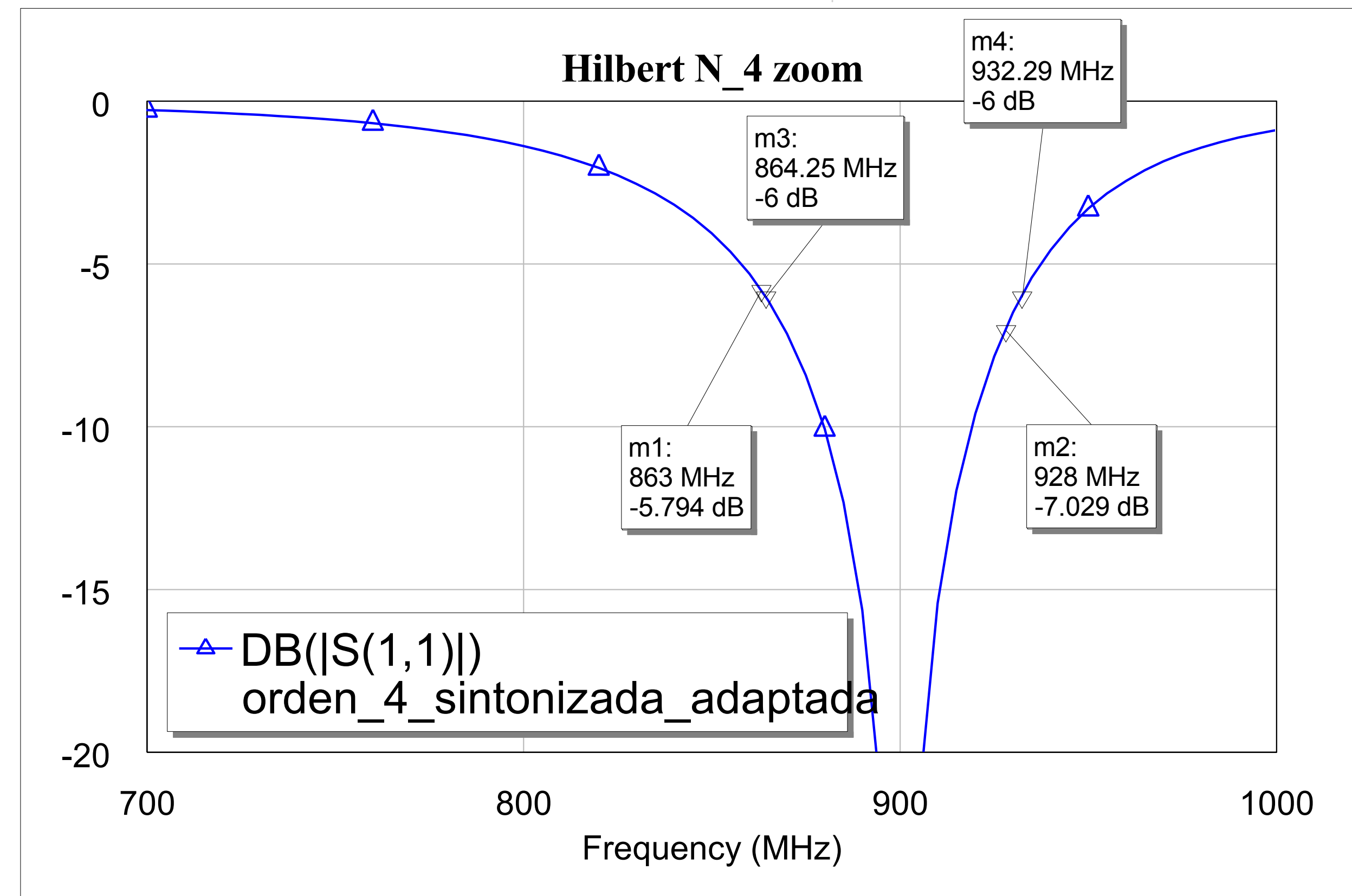


# Diseño y simulación (XI)

## Antena Hilbert N = 4 (IV)



- ✱ Adaptación mucho más sencilla que en la versión anterior
- ✱ Red de elementos concentrados:  
L serie 4.69 nH + C paralelo 4.78 pF
- ✱ BW relativo: 7.57 %
- ✱ Adaptación a 900 MHz: -62.74 dB
- ✱ Eficiencia de radiación a 900 MHz: 75.58%




# Diseño y simulación (XII)

## Comparativa y conclusiones

Descripción	Frecuencia central (MHz)	Ancho de banda relativo (%)	Adaptación a 900 MHz (dB)	Eficiencia de radiación a 900 MHz (%)
N = 2 adaptada	900.345	9.64	-42.24	92.75
N = 3 sintonizada y adaptada	898.055	6.77	-41.45	77.85
N = 4 sintonizada y adaptada	898.27	7.57	-62.74	75.58

Tabla comparativa con los tres modelos que ofrecen mejores resultados



# Estudio de la reusabilidad

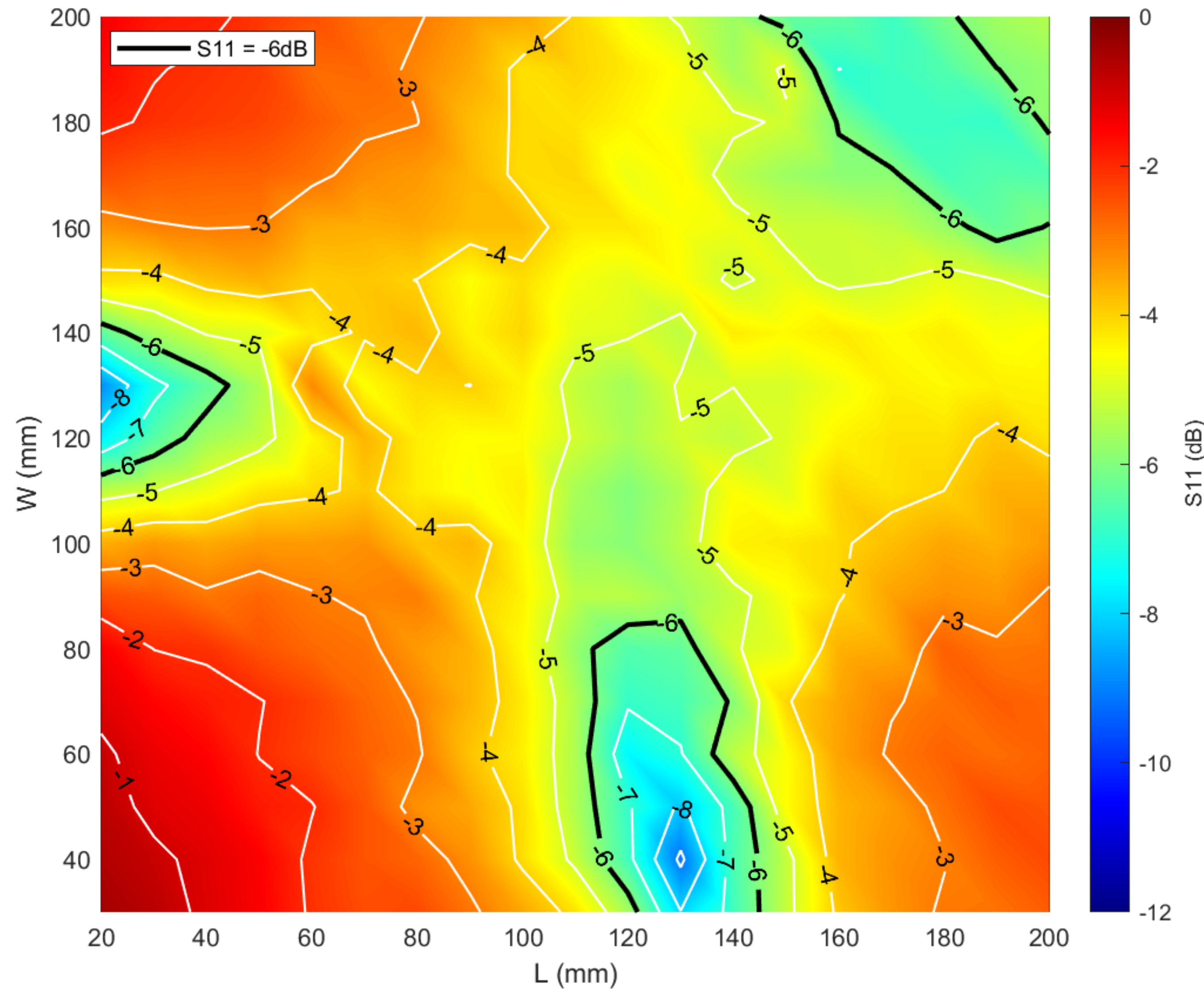
Barrido paramétrico para 360 combinaciones de las dimensiones L y W del plano de masa de la antena

# Reusabilidad (I)

En términos de adaptación de impedancias

Mapa de calor con los peores valores del parámetro S11 en cada una de las combinaciones de L y W:

- ✱ Mejor zona es la cercana al modelo nominal
- ✱ Otras dos zonas cumplen el criterio de  $S_{11} < -6$  dB
- ✱ Tasa de reutilización: 10.52 %

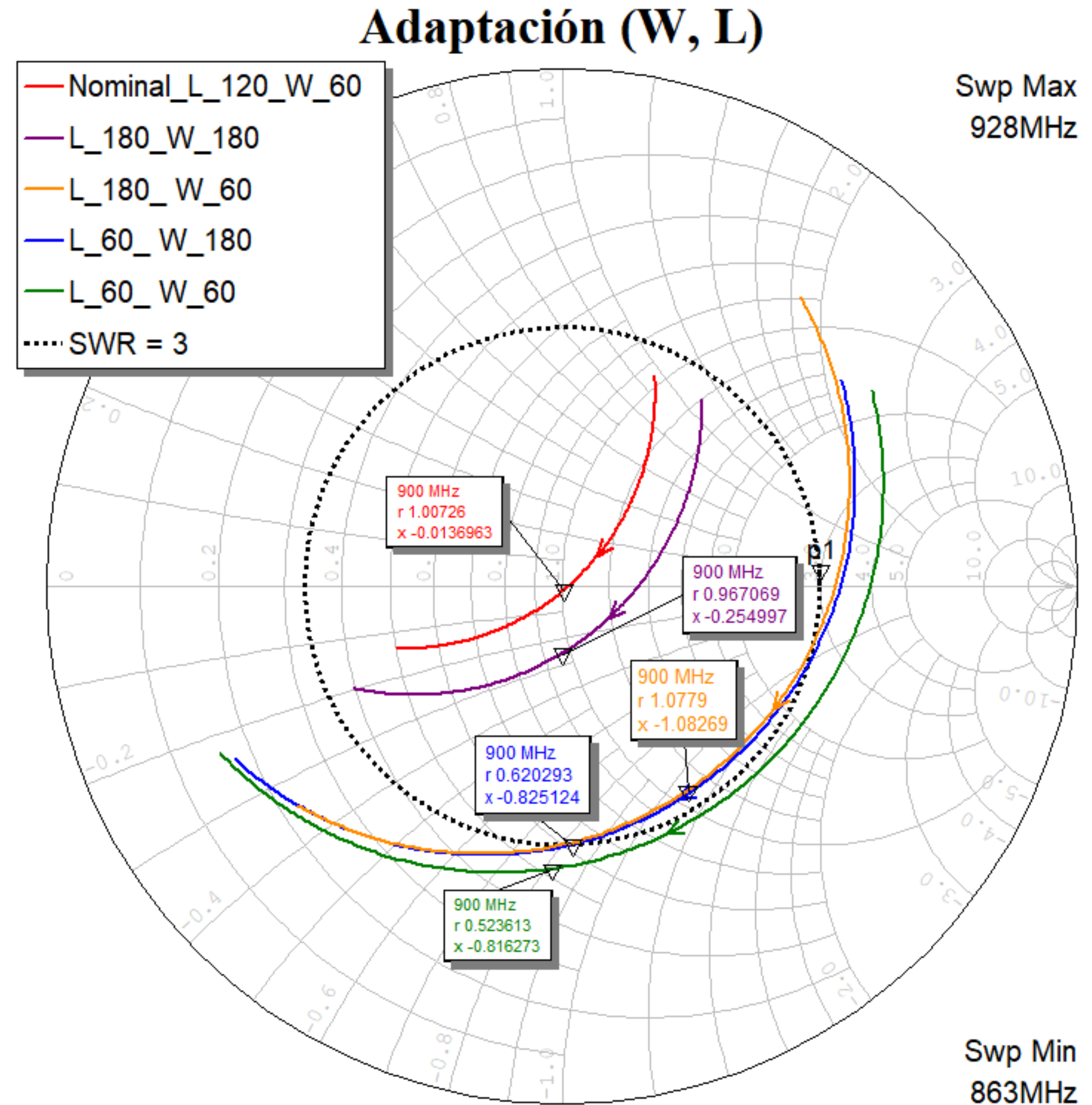


# Reusabilidad (II)

## En términos de adaptación de impedancias (II)

Diagrama de Smith con las trazas correspondientes a cuatro casos "extremos" del mapa de calor + modelo nominal

- ✱ Las variaciones en las dimensiones introducen un comportamiento capacitivo (hacia  $x$  negativas)
- ✱ Propuesta: "desadaptar" el modelo nominal en  $x$  positivas (zona inductiva) para que al variar el tamaño la adaptación permanezca dentro del límite  $SWR = 3$

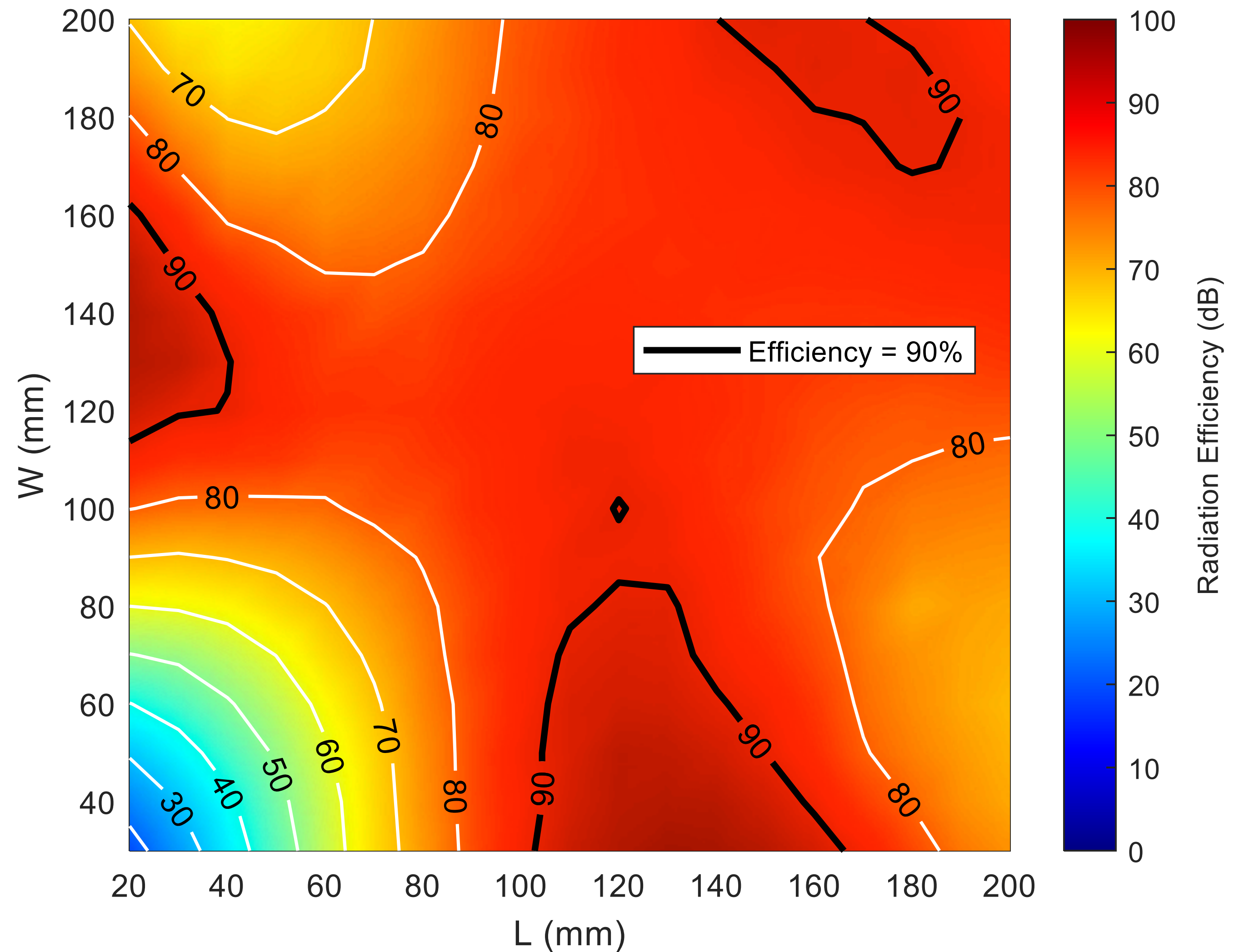


# Reusabilidad (III)

En términos de eficiencia de radiación

Mapa de calor con valores de la eficiencia de radiación en cada una de las combinaciones de L y W:

- ✱ Mejor zona es la cercana al modelo nominal
- ✱ Otras dos zonas cumplen el criterio de RadEff > 90 %
- ✱ Gráfica análoga a la del S11

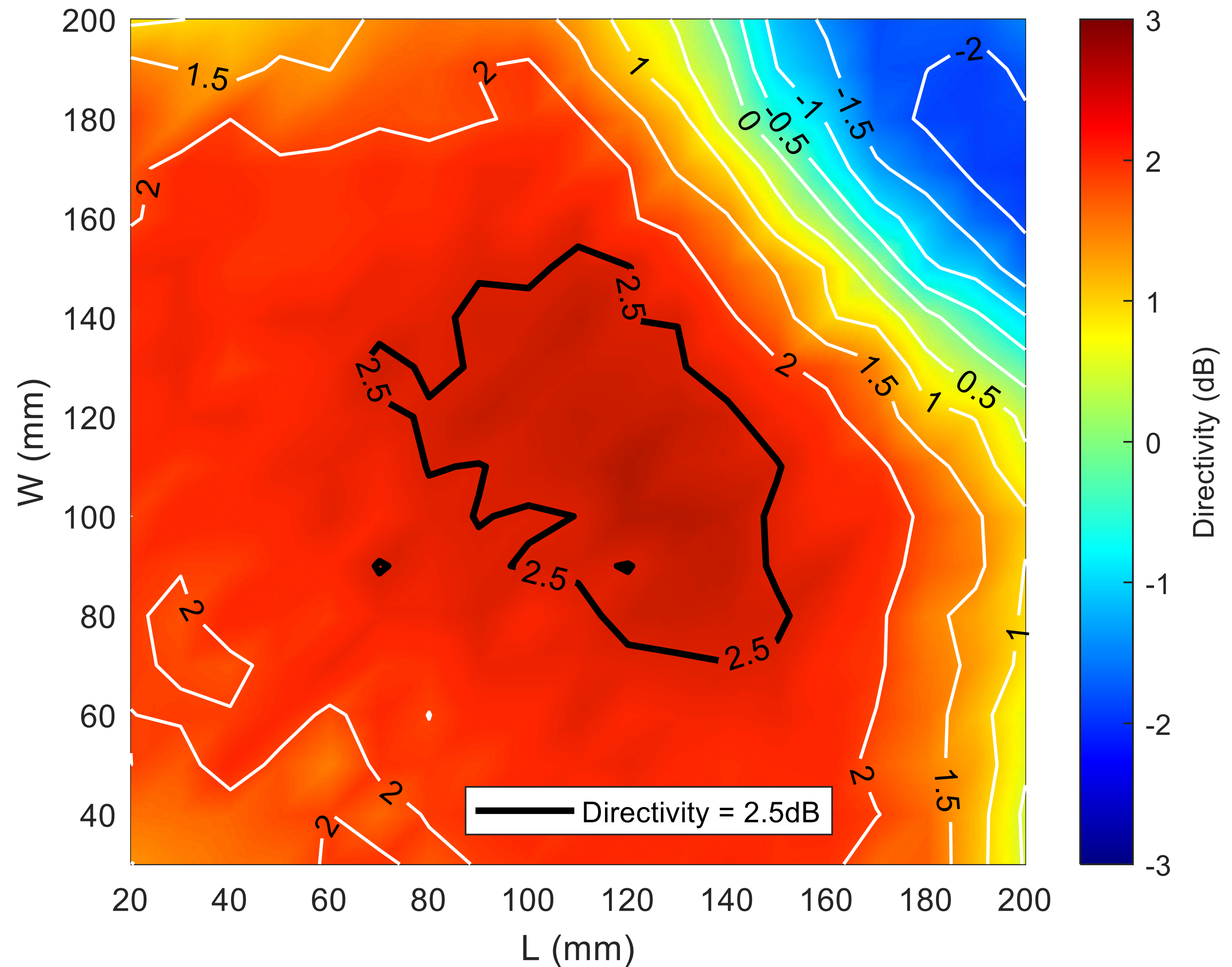


# Reusabilidad (IV)

## En términos de directividad

Mapa de calor con valores de la directividad a 900 MHz en  $\theta = 0^\circ$  y  $\phi = -180^\circ$  en cada una de las combinaciones de L y W:

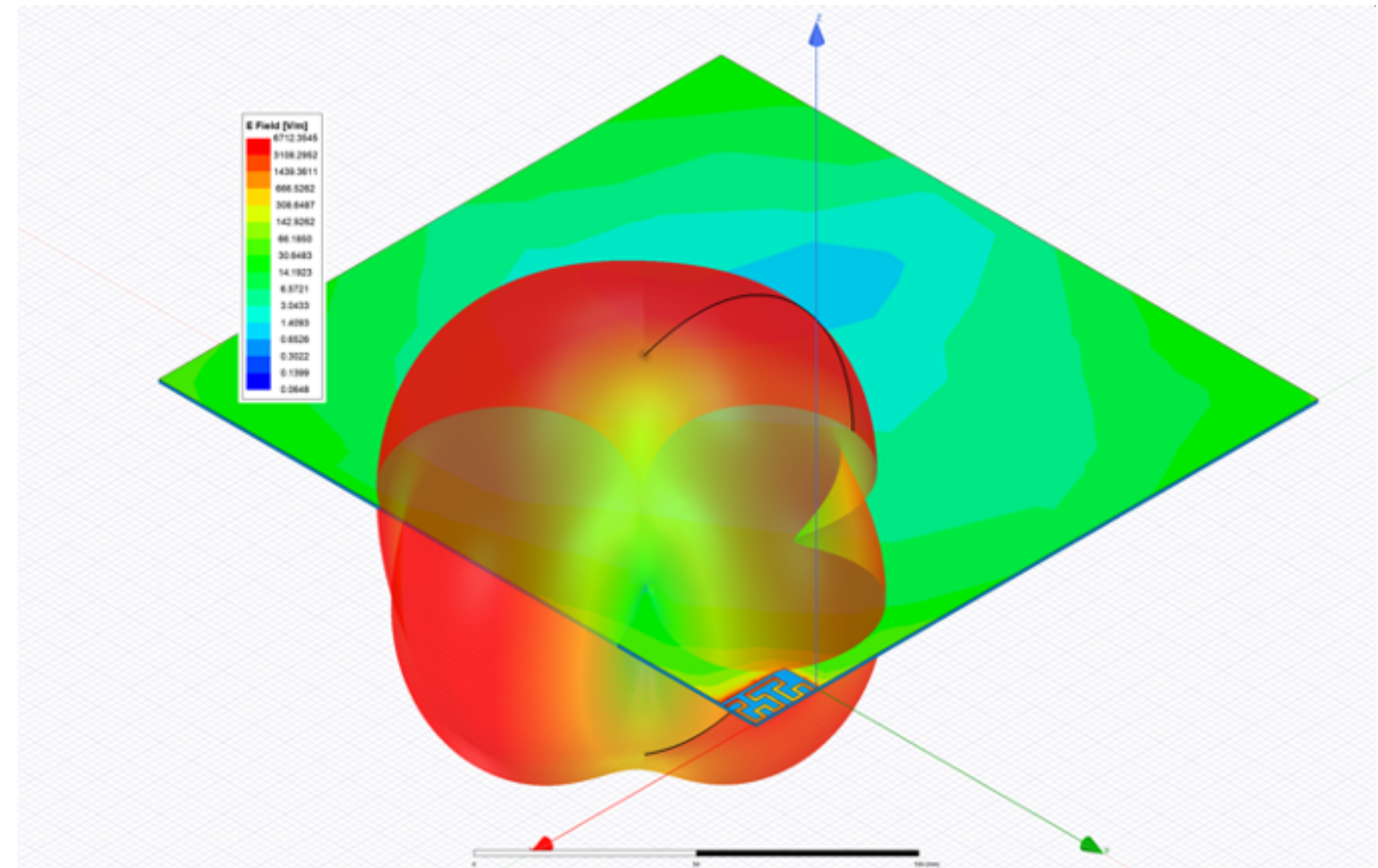
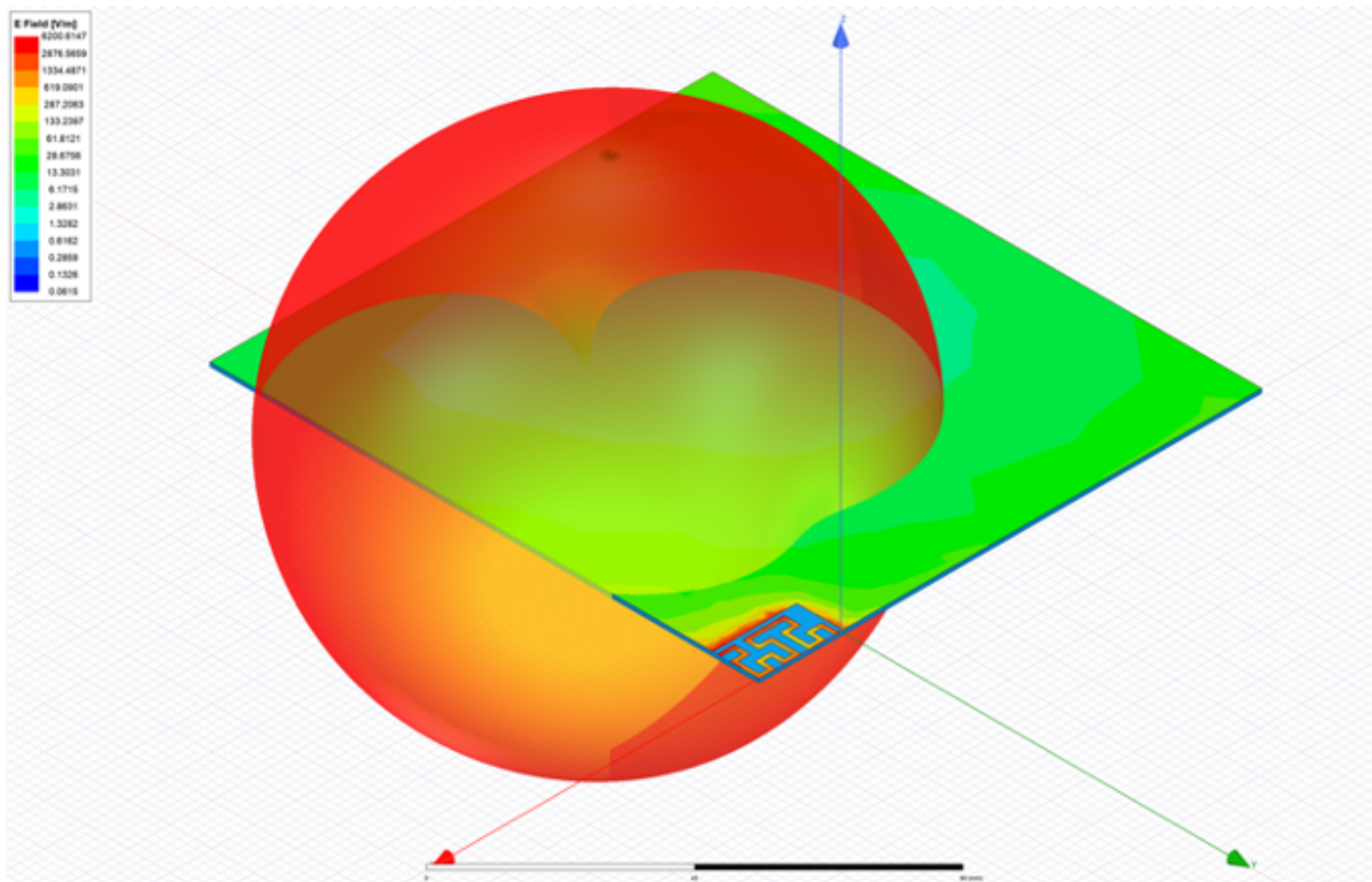
- ✱ Mejor zona es la central:  
L y W = [80 140]
- ✱ Peores resultados en las variaciones cuadradas de mayor área





# Reusabilidad (V)

En términos de directividad (II)



Izquierda: Caso mejor (L y W = 120 mm)

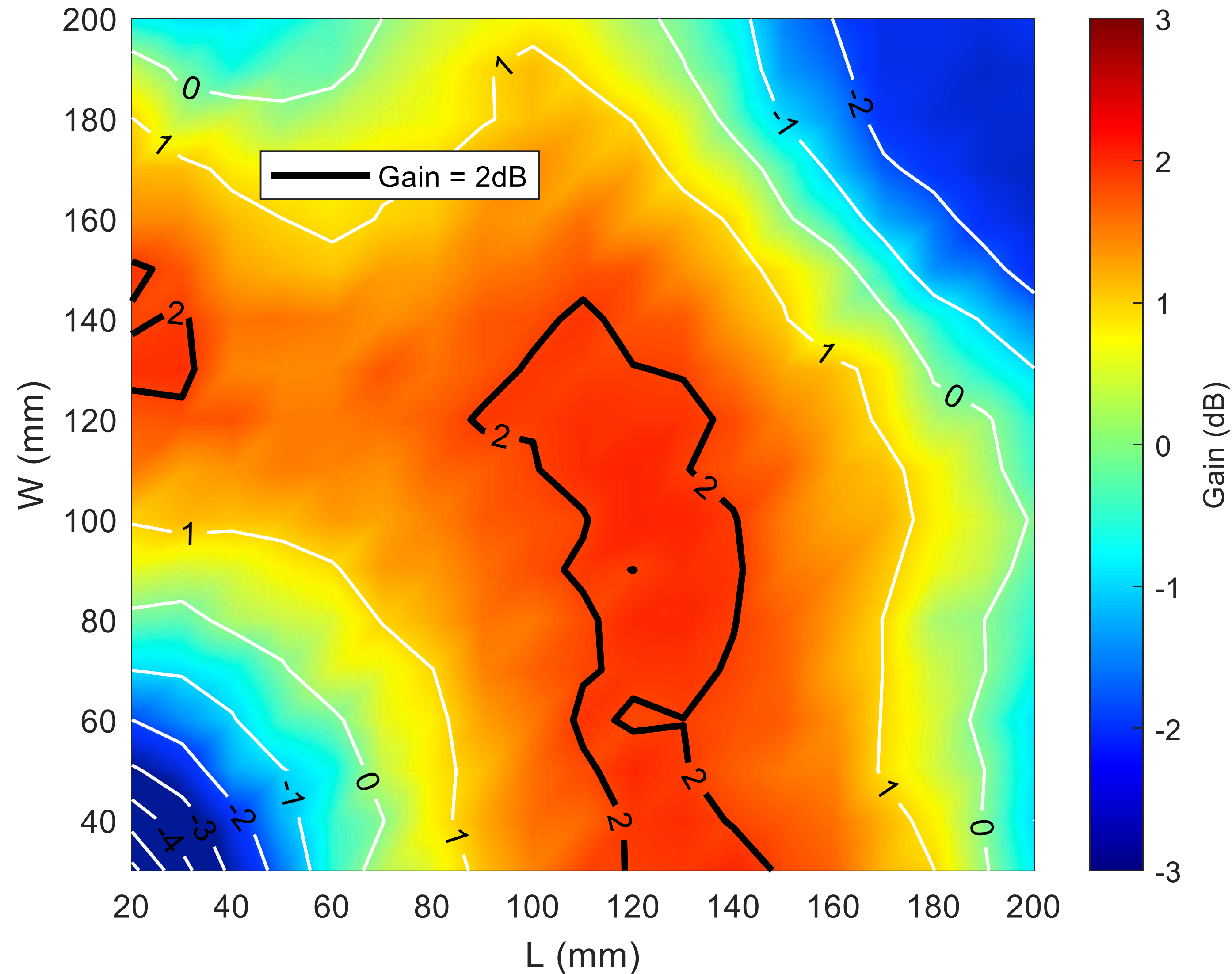
Arriba: Caso peor (L y W = 180 mm)

✱ Degradación de la directividad de la antena entre un caso y otro

# Reusabilidad (VI)

En términos de ganancia

La gráfica muestra una combinación de los resultados vistos anteriormente en eficiencia y directividad, dando lugar a una zona privilegiada en el centro del eje horizontal y del eje vertical respecto al resto





# Conclusiones

Recapitulación de resultados  
y propuestas de trabajo futuro

# Objetivos alcanzados

De los propuestos inicialmente (y alguno más)

- ✱ Se ha llevado a cabo el diseño y simulación de la antena Hilbert en tres órdenes de iteración en base a las reglas definidas en la literatura científica
- ✱ Se ha podido verificar en todos los casos la influencia de la longitud de la curva en la frecuencia de resonancia de la antena
- ✱ Se ha llevado a cabo con éxito el estudio de reusabilidad en términos de adaptación de impedancias y en términos de diferentes parámetros radiación
- ✱ Se ha definido satisfactoriamente un proceso de automatización y sistematización en el post-procesado de las simulaciones, ahorrando tiempo y costes no sólo en el presente trabajo sino para futuros proyectos similares

# Comparativa con otros modelos

De antenas en miniatura para IoT: la antena espiral y la antena *booster*

Tipo de antena	Frecuencia 1 (MHz)	Frecuencia 2 (MHz)	Ancho de banda relativo (%)	Reusabilidad (%)
Hilbert N = 2	857	944	9.6	10.5
Espiral (monopolo)	855	941	9.5	4.6
<i>Booster</i>	825	982	17.4	53.8

- \* La antena *booster* supera a las otras dos tanto en BW como en reusabilidad
- \* La antena Hilbert se presenta como una opción más atractiva en términos de reusabilidad que la espiral

# Propuestas de trabajo futuro

## Partiendo de los resultados obtenidos

- ✱ Estudios sobre la reusabilidad del resto de modelos de la antena Hilbert propuestos con órdenes superiores
- ✱ Análisis de la influencia en la reusabilidad de la antena la adaptación del modelo nominal en impedancias más inductivas
- ✱ Posibilidad de la fabricación de un prototipo para verificar experimentalmente los resultados obtenidos en este trabajo
- ✱ Mejora de los procesos de automatización utilizados en este proyecto para un mayor ahorro de tiempo y costes (en equipos)



# Bibliografía

- \* Red Hat, «¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?», [En línea]. Available: <https://www.redhat.com/es/topics/internet-of-things/what-is-iot>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* McKinsey, «What is the Internet of Things?», [En línea]. Available: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-the-internet-of-things>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* A. Augustin, J. Yi, T. Clausen y W. M. Townsley, «A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,» *Sensors*, vol. 16, nº 9, 2016.
- \* A. Kumar Gupta, P. S. R. Chowdary y M. V. Krishna, «Trends in IoT Antenna Design-A Brief Review,» *TEST. Engineering & Management*, nº Mayo-Junio, pp. 14198-14203, 2020.
- \* M. A. Feki, F. Kawsar, M. Boussard y L. Trappeniers, «The Internet of Things: The Next Technological Revolution,» *Computer*, vol. 46, nº 2, pp. 24-25, 2013.
- \* Norton, «The future or IoT: 10 predictions about the Internet of Things,» [En línea]. Available: <https://us.norton.com/blog/iot/5-predictions-for-the-future-of-iot>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* ARM, «What are IoT devices?», [En línea]. Available: <https://www.arm.com/glossary/iot-devices>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* F. Tubbal, L. Matekovits y R. Raad, «Antenna Designs for 5G/IoT and Space Applications,» *Electronics*, vol. 11, nº 2484, p. 4, 2022.
- \* L. Anchidin, A. Lavric, P.-M. Mutescu, A. I. Petrariu y V. Popa, «The Design and Development of a Microstrip Antenna for Internet of Things Applications,» *Sensors*, vol. 23, nº 3, p. 1062, 2023.
- \* N. Ojaroudi Parchin, H. Jahanbakhsh Basherlou, Y. I. A. Al-Yasir, R. A. Abd-Alhameed, A. M. Abdulkhaleq y J. M. Noras, «Recent Developments of Reconfigurable Antennas for Current and Future Wireless Communication Systems,» *Electronics*, vol. 8, nº 128, p. 17, 2019.
- \* J. Constantine, Y. Tawk, S. E. Barbin y C. G. Christodoulou, «Reconfigurable Antennas: Design and Applications,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, nº 3, pp. 424-437, 2015.
- \* W. Li, S. Gao, Y. Cai, Q. Luo, M. Sobhy, G. Wei, J. Xu, J. Li, C. Wu y Z. Cheng, «Polarization-Reconfigurable Circularly Polarized Planar Antenna Using Switchable Polarizer,» *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, nº 9, pp. 4470-4477, 2017.
- \* M. Shirazi, J. Huang, T. Li y X. Gong, «A Switchable-Frequency Slot-Ring Antenna Element for Designing a Reconfigurable Array,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, nº 2, pp. 229-233, 2018.
- \* J. Anguera, C. Picher, A. Bujalance y A. Andújar, «Ground plane booster antenna technology for smartphones and tablets,» *Microwave and optical technology letters*, vol. 58, nº 6, pp. 1289-1294, 2016.
- \* J. Lee, J. Kum, D. Ha y Y. Lee, «Designing antenna booster cases for mobile phones using capacitive coupling techniques,» de *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver (Canada), 2015.
- \* H. Saghlatoon y P. Mousavi, «A novel booster antenna on flexible substrates for metal proximity NFC applications,» de *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver (Canada), 2015.
- \* J. Gui, A. Andújar y J. Anguera, «On the reuse of a matching network for IoT devices operating at 900 MHz embedding antenna boosters,» *Electronics*, vol. 11, nº 1267, p. 14, 2022.
- \* J. M. J. W. Jayasinghe, A. Andújar y J. Anguera, «On the properties of Sierpinski gasket fractal microstrip antennas,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, nº 1, 2019.
- \* C. Puente, J. Anguera, C. Borja y J. Soler, «Fractal-Shaped Antennas and their Applications to GSM 900/1800,» *The Journal of the Institution of British Telecommunications*, vol. 2, nº 3, 2001.
- \* J. Anguera, A. Andújar, J. Jayasingue, V. V. S. S. Sameer, P. S. R. Chowdary, T. Ali, J. L. Pijoan y C. Cattani, «Fractal Antennas: An Historic Perspective,» *Fractal and Fractional*, vol. 4, nº 3, p. 26, 2020.
- \* J. Anguera, A. Andújar, S. Benavente, J. Jayasinghe y S. Kahng, «High-Directivity Microstrip Antenna with Mandelbrot Fractal Boundary,» *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 12, nº 4, pp. 569-575, 2018.
- \* J. Anguera, C. Puente, E. Martínez y E. Rozan, «The fractal hilbert monopole: A two-dimensional wire<sup>o</sup>,» *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 36, nº 2, pp. 102-104, 2003.
- \* P. Garu y W.-C. Wang, «Design and Analysis of a PDLC-Based Reconfigurable Hilbert Fractal Antenna for Large and Fine THz Frequency Tuning,» *Micromachines*, vol. 13, nº 6, p. 964, 2022.
- \* T. Dong, X. Zhu, M. Li, Y. Zhang, B. Zhou, H. Zeng y M.-C. Tang, «Design of electrically small Hilbert fractal NRFP magnetic monopole antennas,» *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 33, nº 4, pp. 1-11, 2018.
- \* H. Zhang, D. Chen y C. Zhao, «A Novel Printed Monopole Antenna With Folded Stepped Impedance Resonator Loading,» *IEEE Access*, 2017.
- \* T. Jia, J. Yang, Y. Zhang, W. Jiang y Y. Zheng, «A Wide-Beam 3D-Fractal Hilbert GNSS Antenna,» de *IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, 2021.
- \* Y. Zemam, N. Boukli Hacene y Y. Belhadef, «Hilbert Fractal PIFA Antenna for DCS, PCS, UMTS and WiMAX Wireless Applications,» *Engineering Proceedings*, vol. 14, nº 2, p. 6, 2022.
- \* D.-O. Kim, C.-Y. Kim y D.-G. Yang, «Flexible Hilbert-Curve Loop Antenna Having a Triple-Band and Omnidireccional Pattern for WLAN/WiMAX Applications,» *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, p. 9, 2012.
- \* Telefónica, «Los dispositivos IoT y su impacto en la sostenibilidad,» [En línea]. Available: <https://www.telefonica.com/es/sala-comunicacion/blog/los-dispositivos-iot-y-su-impacto-en-la-sostenibilidad/>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* BBVA, «Internet de las cosas y su impacto en la sostenibilidad,» [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/internet-de-las-cosas-y-su-impacto-en-la-sostenibilidad/>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* S. Fynn, «Embracing Diversity and Inclusion in IoT,» IoT for All, [En línea]. Available: <https://www.iotforall.com/embracing-diversity-and-inclusion-in-iot>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* L. Lizzi, F. Ferrero, P. Monin, C. Danchesi y S. Boudaud, «"Design fo miniature antennas for IoT applications",» de *IEEE Sixth International Conference on Communications and Electronics (ICCE)*, Ha-Long (Vietnam), 2016.
- \* S. Koziel y A. Pietrenko-Dabrowska, «On nature-inspired design optimization of antenna structures using variable-resolution EM models,» *Scientific Reports*, vol. 13, nº 1, 2023.
- \* J. Zhu, A. Hoorfar y N. Engheta, «Bandwidth, Cross-Polarization, and Feed-Point Characteristics of Matched Hilbert Antennas,» *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 2, pp. 2-5, 2003.
- \* U. Khayam y F. Alfaruq, «Design of Hilbert Antenna as Partial Discharge Sensor,» de *2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, Chemical Engineering (ICIMECE)*, 2016.
- \* Ansys, «HFSS Ansys,» [En línea]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>. [Último acceso: 20 06 2020].
- \* Ansys, «ANSYS HFSS for Antenna Simulation,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Yasaman-Moradi-3/post/How\\_does\\_ANSYS\\_HFSS\\_software\\_measures\\_the\\_gain\\_of\\_an\\_antenna\\_Any\\_theoretical\\_reference\\_that\\_can\\_be\\_useful/attachment/5f10d4775e3fff00017870a4/AS%3A914052419162112%401594938487443/download/ab-ansys](https://www.researchgate.net/profile/Yasaman-Moradi-3/post/How_does_ANSYS_HFSS_software_measures_the_gain_of_an_antenna_Any_theoretical_reference_that_can_be_useful/attachment/5f10d4775e3fff00017870a4/AS%3A914052419162112%401594938487443/download/ab-ansys). [Último acceso: 20 06 2023].
- \* J. A. Solano Pérez, M. T. Martínez Inglés, J. M. Molina García Pardo, J. Romeu, L. Jofre-Roca, C. Ballesteros Sánchez, J. V. Rodríguez, A. Mateo Aroca y R. Guzmán Quirós, «On differential imaging using electromagnetic simulation for vehicular antenna signature analysis,» *Sensors*, vol. 21, nº 11, p. 3796, 2021.
- \* J. B. Romdhane Hajri, D. Inserra, W. Gu, W. Hu, Y. Huang, J. Li y W. Guangjun, «Fast and automatic RF DesignBased on MATLAB-HFSS Control Applied on Magnetic Absorber with Metasurface,» de *Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall)*, Xiamen (China), 2019.
- \* T. Sheret, C. Parini y B. Allen, «Efficient design of a radome for minimised transmission loss,» *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, nº 15, pp. 1662-1666, 2016.
- \* L. Zhu, W. Wu y D.-G. Fang, «Design of 1-D Transmitarray Antenna Using HFSS FEM-IE,» de *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shanghai (China), 2020.
- \* A. Talukder y E. Islam, «Design and Simulation Study of E Shaped Slotted Microstrip Patch Antenna by HFSS for 5G applications,» de *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (APS/URSI)*, Singapore (Singapore), 2021.
- \* Ansys, «Cosimulation Using Ansys HFSS and Circuit,» [En línea]. Available: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/cosimulation-using-ansys-hfss/lessons/cosimulation-using-ansys-hfss-and-circuit-lesson-2/>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* Ansys, «Circuit Hierarchy (Ansys HFSS 3D Layout Getting Started Course),» [En línea]. Available: [https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS\\_3DLGS\\_2019R3\\_EN\\_LE06\\_CircHier-1.pdf](https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS_3DLGS_2019R3_EN_LE06_CircHier-1.pdf). [Último acceso: 20 06 2023].
- \* Ansys, «Workshop 4.2: Patch antenna, Smith chart and Field plots,» [En línea]. Available: [https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS\\_GS\\_2020R2\\_EN\\_WS4.2\\_PatchSmithFields.pdf](https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS_GS_2020R2_EN_WS4.2_PatchSmithFields.pdf). [Último acceso: 20 06 2023].
- \* M. Jezzini, P. J. Marraccini y F. H. Peters, «Simulating a high speed vertical transition with HFSS, using IronPython to import a DXF file,» de *ANSYS Conference & 2nd CADFEM Ireland Users' Meeting*, Dublin (Ireland), 2015.
- \* Scikit, «Scikit-*rf*: Descripción del proyecto,» [En línea]. Available: <https://pypi.org/project/scikit-rf/>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* Science Direct, «Radiation Efficiency,» [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/radiation-efficiency>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* A. D. Govind, «Antenna Impedance Matching - Simplified,» [En línea]. Available: <https://abracon.com/uploads/resources/Abracon-White-Paper-Antenna-Impedance-Matching.pdf>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* Fundamentos Radar, «Directividad y ganancia de la antena,» [En línea]. Available: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an07.es.html>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* RF Venue, «What is Antenna Gain?,» [En línea]. Available: <https://www.rfvenue.com/blog/2014/12/15/what-is-antenna-gain>. [Último acceso: 20 06 2023].
- \* B. Oller, A. Andújar y J. Anguera, «Antenna Booster Versus a Spiral Monopole Antenna for Single-Band Operation at 900 MHz,» *Electronics*, vol. 12, nº 2067, p. 12, 2023.
- \* G. Bauch y A. Alexiou, «MIMO technologies for the wireless future,» de *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Cannes (France), 2008.
- \* K. Wang, S. Zhang y J. Wang, «Feasibility of using an S-band GNSS carrier by comparing with L and C bands,» *Advances in Space Research*, vol. 66, pp. 2232-2244, 2020.
- \* D. Khosla, «Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Mobile Communication: A Review,» *Journal of Mobile Computing, Communications & Mobile Networks*, vol. 6, nº 2, pp. 10-14, 2019.
- \* Ansys, «Solvers, Meshing and Solution Setup (ANSYS HFSS 3D Layout Getting Started Course),» [En línea]. Available: [https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS\\_3DLGS\\_2019R3\\_EN\\_LE03\\_Sol-1.pdf](https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS_3DLGS_2019R3_EN_LE03_Sol-1.pdf). [Último acceso: 20 06 2023]

**“Lo que sabemos es poco.  
Lo que no sabemos es inmenso”**

P. S. Laplace (1749 - 1827)