



Análisis electromagnético mediante FDTD de un sustrato para etiquetas RFID pasivas

Mario Ángel Rico Méndez*, Norma Patricia Puente Ramírez*, Noemí Lizárraga Osuna**

DOI: /https://doi.org/10.29105/cienciauanl23.103-3

RESUMEN

La tecnología RFID, la cual permite el reconocimiento de objetos y transmisión de datos mediante señales de radiofrecuencia, presenta un desempeño que depende del material del producto al que son adheridas, por ello para su funcionamiento óptimo en cualquier producto es necesario diseñar un sustrato para la etiqueta RFID que evite la IEM. Se presenta un análisis en un sustrato para etiquetas RFID mediante el método FDTD, el cual demuestra que con el uso del sustrato se reflejan las OEM hacia la etiqueta RFID, aislando la etiqueta del producto al cual se adhiere y con esto evitar la IEM.

Palabras clave: etiqueta RFID, interferencia electromagnética, ley de Snell, FDTD.

La tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID) automatiza de forma remota la identificación, la cual permite el reconocimiento de objetos y transmisión de datos mediante señales de radiofrecuencia. El sistema RFID está formado por un lector, una antena transmisora y una etiqueta también conocida como tag. La etiqueta es una de las partes más importantes del sistema y su rendimiento afecta en gran medida el rango de lectura y la precisión de este sistema (Liu, Yu y He, 2013; Tsai *et al.*, 2013). La comunicación entre el lector y la etiqueta es establecida por retrodispersión de ondas electromagnéticas en el campo lejano (Soyata, Copeland y Heinzelman, 2016; Bibi *et al.*, 2017). La parte de la energía recolectada es usada para extraer los datos almacenados en el circuito integrado (CI) de la etiqueta y enviados a la lectora, donde se almacenan para su procesamiento. Debido a su bajo costo y pequeñas dimensiones, este sistema es encontrado en diferentes aplicaciones en varias áreas como casetas de peaje, identificación, gestión de control vehicular, monitoreo de ganado, además de una variedad de aplicaciones médicas (Magill, Conway y Scanlon, 2017).

ABSTRACT

RFID technology, allows object recognition and data transmission using radio signals. However, RFID's performance depends on the product's material into which the RFID tag is adhered. Because of the latter; to enhance the RFID's performance, the substrate of the RFID tag needs to be design in order to avoid EMI. The present research, presents an analysis on an RFID tag enhanced substrate, produced by means of the FDTD technique. Which demonstrates that with the use of the substrate electromagnetic waves are reflected towards the tag, isolating the effects of the product's material, avoiding EMI.

Keywords: RFID Tag, Electromagnetic Interference, Snell's Law, FDTD.

La frecuencia de operación del sistema RFID es diferente según el país donde es utilizada. Como ejemplo, las bandas en América del Norte y Sudamérica operan en un rango de 902-956 MHz, en Europa la banda utilizada es de 866-869 MHz. La etiqueta está formada por una estructura conductora, un circuito integrado de aplicación específica (ASIC, por sus siglas en inglés) y un sustrato, el cual sirve para mantener tanto el ASIC y la estructura conductora en su sitio (Tsai *et al.*, 2013). Las etiquetas pueden ser activas, pasivas o semipasivas.

Las etiquetas pasivas usualmente se adhieren al objeto que se desea identificar; sin embargo, este objeto puede ser de diferentes materiales, como metal, polímeros, dieléctrico u otros; causando que las características de atenuación e impedancia de la etiqueta RFID se degraden, lo que afecta su rango de lectura (Zhang *et al.*, 2017), interpretando estos cambios como interferencia electromagnética (IEM) entre la lectora y la etiqueta. Para evitar la IEM se han

* Universidad Autónoma de Nuevo León.

** Universidad Autónoma de Baja California.

Contacto: norma.puenterm@uanl.edu.mx

propuesto diferentes diseños de etiquetas RFID, principalmente para objetos metálicos (Björminen *et al.*, 2014; Bong, Lim y Lo, 2017), además de algunos sustratos (Ukkonen, Sydanheimo y Kivikoski, 2004), formando un área de estudio para el diseño y comportamiento de las etiquetas para diferentes aplicaciones. Sin embargo, para evitar la interferencia electromagnética se ha atenuado la impedancia de la estructura de la antena y del ASCI de la etiqueta a diversos materiales, por ejemplo, metal, plástico, madera, y así conservar la cantidad de energía suficiente para que exista comunicación entre la etiqueta y el lector. Los trabajos citados se basan principalmente en la modificación y diseño de las características de la propia etiqueta RFID, sin considerar la aplicación de un sustrato que sea utilizado para disminuir la IEM en la etiqueta RFID.

En este trabajo se realiza un análisis electromagnético de un sustrato con una geometría intrínseca formada por diferentes índices de refracción en su interior, el cual pretende evitar la IEM que se genera en las etiquetas RFID pasivas.

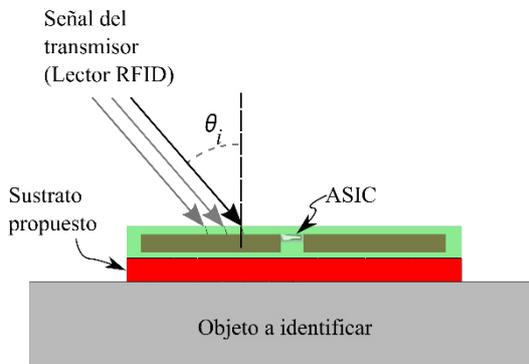


Figura 1. Etiqueta RFID adherida al sustrato propuesto y al objeto a identificar, el sustrato (rojo) se coloca entre estos dos.

Se describe la configuración del sustrato, el cual es capaz de reflejar las ondas EM que inciden en su interior, además de las condiciones que se deben cumplir para la reflexión total interna. Además, una breve introducción al método FDTD y el análisis numérico del sustrato. Por último, se presentan los resultados obtenidos por la propagación de las ondas EM en el sustrato. En la figura 1 se presenta el esquema propuesto para evitar la IEM en la etiqueta RFID.

CONFIGURACIÓN DEL SUSTRATO

El sustrato se diseña mediante una configuración que se calcula con la teoría de rayos, asumiendo la longitud de onda es mucho menor comparado con las dimensiones del medio donde se propaga $\lambda \ll d$. Mediante la ecuación de la ley de Snell (Hecht, 2002) se describe el comportamiento de un rayo, en la frontera entre dos medios de propagación con diferentes índices de refracción, que se describe a continuación,

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1)$$

donde n_i, n_t describen los índices de refracción del medio de propagación incidente y de transmisión, respectivamente. Además, el ángulo de incidencia de dicha onda electromagnética en el medio incidente y de transmisión se describe mediante los ángulos θ_i, θ_t . Es importante detallar que este modelo considera la fabricación con cualquier material que cumpla con el índice de refracción.

Al aplicar la ley de Snell para obtener las trayectorias de los rayos, se propone la configuración del sustrato, donde las trayectorias serán reflejadas hacia la superficie del sustrato evitando la IEM generada. La reflexión total interna que se presenta cuando los rayos se propagan entre dos medios, si el primero de ellos es denso, es decir, con un índice de refracción mayor, comparado con el índice de refracción del segundo medio de propagación (Iizuka, 2002). Si existe esta condición, entonces se presenta un cambio en el ángulo de la onda transmitida, lo cual supera el ángulo de la superficie de contacto entre los dos medios de propagación, por lo tanto, sólo se tendrá un ángulo de incidencia y de reflexión. Al ángulo mínimo para el cual la reflexión total interna da lugar se conoce como ángulo crítico y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_t}{n_i} \quad (2)$$

La configuración del sustrato propuesto se realizó considerando las trayectorias de los rayos en cada una de las superficies de contacto utilizando las ecuaciones (1) y (2), de esta forma se obtiene cada una de las trayectorias resultantes en cada frontera.

La figura 2 muestra las trayectorias de los rayos al interior del sustrato, obteniendo un ángulo de transmisión $\theta_{t,N0-N1}$ en la frontera entre los medios de propagación N0-N1.

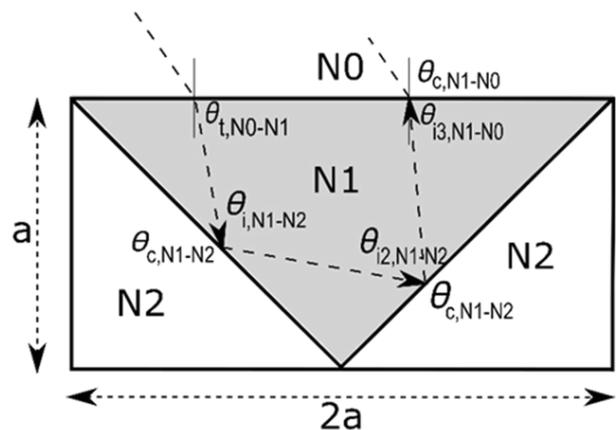


Figura 2. Trayectorias de los rayos en el interior del sustrato.

Además, se obtienen el ángulo crítico $\theta_{c,N1-N2}$ entre la frontera N1-N2, este ángulo es parte importante para la reflexión en el interior del sustrato, ya que los ángulos $\theta_{i,N1-N2}$ y $\theta_{t,N1-N2}$ de

las ondas que incidan en esta frontera entre los medios N1-N2 son mayores a $\theta_{c,N1-N2}$ debido los ángulos e índices de refracción que conforman la estructura propuesta.

El diseño del sustrato resultante es una formación de “n” secciones iguales a la figura 2 en forma secuencial hasta cubrir la longitud total de la etiqueta.

Las trayectorias de los rayos que se obtienen se corroboran en la siguiente sección donde los rayos serán tratados como ondas EM con sus componentes de campo eléctrico y magnético, asumiendo que la longitud de onda es igual al medio donde se propagan $\lambda = d$ donde d es la longitud del medio de propagación.

ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (FDTD)

El sustrato propuesto se somete a un análisis electromagnético más robusto por medio del método de análisis numérico conocido como FDTD (*Finite Differences in Time Domain*), este método reproduce el proceso natural de la propagación de una onda EM, utilizado principalmente para aplicaciones en problemas de energía en el rango de microondas, el método describe las ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial parcial que hasta el día de hoy son afirmaciones matemáticas que rigen las leyes fundamentales de la electrodinámica clásica (Jackson, 1980). Las cuatro ecuaciones de Maxwell se describen a continuación en su forma integral como diferencial (Inan y Marshall, 2011).

1. Ley de Faraday se basa en que un flujo magnético variante en el tiempo induce una fuerza electromotriz:

$$\oint_c E dl = \oint_s \frac{\partial B}{\partial t} ds \rightarrow \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (3)$$

2. Ley de Gauss es la expresión matemática que describe las cargas eléctricas que se atraen o repelen una a la otra con una fuerza inversamente proporcional a la distancia entre ellas:

$$\oint_s D ds = \int_v \rho dv \rightarrow \nabla \times \vec{D} = \rho. \quad (4)$$

3. Ley de Ampere representa la integral de línea de un campo magnético H sobre un perímetro encerrado que debe ser igual al total de la corriente encerrada en ese perímetro:

$$\oint_c H dl = \int_s J ds + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} ds \rightarrow \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (5)$$

4. La cuarta ecuación de Maxwell se basa en el hecho de que no existen cargas magnéticas y por lo tanto las líneas de campo siempre están encerradas por si mismas:

$$\oint_s B ds = 0 \rightarrow \nabla \times \vec{B} = 0. \quad (6)$$

Las ecuaciones (3-6) son de forma continua, para aplicar el método FDTD se trasladan a la forma discreta mediante el uso de la serie de Taylor (ecuación (7)) en cada ecuación parcial de la forma diferencial de las ecuaciones de Maxwell (Schneider, 2010).

$$f(x, y) = f(x, t_0) + (t - t_0) \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_x + \frac{1}{2} (t - t_0)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial^2 t} \Big|_x + \dots + \frac{1}{n!} (t - t_0)^n \frac{\partial^n f}{\partial^n t} \Big|_x + \dots \quad (7)$$

Una vez que se discretizan las ecuaciones se obtiene su forma diferencial finita utilizando la estructura básica para este método, conocida como celda de Yee, también se le llama nodo escalonado debido a que cada una de las seis componentes de campo electromagnético se calcula en una posición diferente en el espacio (Yee, 1966).

Para el análisis electromagnético del sustrato se utilizan las ecuaciones de Maxwell en dos dimensiones debido a que una de las componentes en su configuración intrínseca se mantiene constante. Al utilizar la celda de Yee para las ecuaciones en dos dimensiones (Ramo, Whinnery y Duzer, 2008), se obtienen las siguientes ecuaciones en diferencias finitas para el modo transversal magnético (TM),

$$H_x \Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} = H_x \Big|_{i,j+1/2}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_{i,j+1/2} \Delta y} \left[E_z \Big|_{i,j+1}^n - E_z \Big|_{i,j}^n \right], \quad (8)$$

$$H_y \Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} = H_y \Big|_{i+1/2,j}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu_{i+1/2,j} \Delta x} \left[E_z \Big|_{i+1,j}^n - E_z \Big|_{i,j}^n \right], \quad (9)$$

$$E_z \Big|_{i,j}^{n+1} = E_z \Big|_{i,j}^n \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j}} \left[\frac{H_y \Big|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \dots - \frac{H_x \Big|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right], \quad (10)$$

para el modo transversal eléctrico (TE) se obtiene la siguiente ecuación,

$$E_x|_{i+1/2,j}^{n+1} = E_x|_{i+1/2,j}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon_{i+1/2,j} \Delta y} \dots \left[H_z|_{i+1,j+1/2}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2}^{n+1/2} \right], \quad (11)$$

$$E_y|_{i,j+1/2}^{n+1} = E_y|_{i,j+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j+1/2} \Delta y} \dots \left[H_z|_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} - H_z|_{i-1/2,j+1/2}^{n+1/2} \right], \quad (12)$$

$$E_z|_{i,j}^{n+1} = E_z|_{i,j}^n \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j}} \left[\frac{H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - H_y|_{i-1/2,j}^{n+1/2}}{\Delta x} - \dots \frac{H_y|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} \right]. \quad (13)$$

ANÁLISIS NUMÉRICO

El sustrato propuesto se diseña numéricamente mediante el método FDTD, además de crear el algoritmo para representar las ecuaciones (8-13), también se trazan los diferentes índices de refracción del sustrato para modelar su geometría intrínseca presentada en la sección anterior. Se realizó una matriz con las siguientes longitudes 2m x 4m $\Delta x = 1000, \Delta y = 500$, donde se seccionó el área total en incrementos de $\Delta x = \Delta y = 0.004m$.

El sustrato diseñado se normalizó para una frecuencia de 918 MHz, se hizo para observar el comportamiento de las ondas EM en el interior del sustrato ya que, si no es normalizada, el comportamiento de la onda no se apreciaría. La onda EM se hizo incidir a 0.4 m de distancia del sustrato, ésta se propaga en todas direcciones al arribar a la frontera entre el aire ($n = 1$) y el sustrato, parte de la onda EM se refleja debido a que la geometría intrínseca marcada como N1 (figura 2) tiene un índice de refracción de $n=2.56$, por lo tanto una proporción de la onda es también transmitida al interior del sustrato propuesto.

RESULTADOS

La proporción de la onda transmitida al interior del sustrato es reflejada en su totalidad en la frontera correspondiente a N1-N2 (figura 2), con excepción en los vértices de las geometrías intrínsecas al sustrato, consecuencia de que en los vértices no existe el mismo ángulo de incidencia dado por la frontera N1-N2.

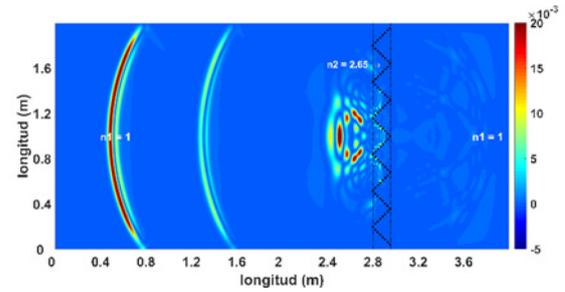


Figura 3. Onda EM reflejada por un sustrato con estructura triangular.

En la figura 3 se observa que la mayor parte de la onda EM que incide en el sustrato propuesto es reflejada, el resto pasa a través de los vértices de la geometría intrínseca del sustrato propuesto.

La energía reflejada se calculó en $\Delta x = 699, \Delta y = 500$ es un punto antes del sustrato. En la figura 4 se observa cómo el porcentaje de la onda EM al inicio de su propagación se mantiene a 100% antes de incidir en el sustrato desde $t=0$ hasta $t=1.37ns$. En un tiempo $t=5.37ns$ es donde la onda EM comienza a salir del interior del sustrato, hasta un tiempo de $t=6.7ns$ 93% de la onda es reflejada hacia la frontera de incidencia inicial.

Tabla I. Porcentaje de la onda EM durante su tiempo de propagación dentro del sustrato 1.37ns - 6.67ns.

Tiempo	Porcentaje de la onda EM
1.37ns	99%
2.03ns	72.6%
2.70ns	44.6%
3.36ns	37.8%
4.70ns	36.83%
5.37ns	38.4%
6.67ns	93.4%

La tabla I anuncia los tiempos en intervalos de 0.67ns a partir del tiempo $t=1.37ns$ cuando la onda EM hace contacto con el sustrato propuesto, los cuatro primeros tiempos detallan cómo la onda EM disminuye al incidir en el sustrato. En el tiempo 3.36ns sólo 36% de la onda EM ha sido reflejada. Los dos últimos tiempos (5.37ns, 6.67ns) representan cómo la onda EM comienza a ser reflejada desde el interior del sustrato. Un tiempo 5.3ns después de hacer contacto con el sustrato 93% de la onda es reflejada.

CONCLUSIONES

El sustrato propuesto recupera hasta 93% de la onda EM que le incide. Por lo tanto, es viable que un sustrato con una geometría intrínseca formada por diferentes índices de refracción redirija las ondas EM en su interior. La proporción restante de la onda después de los 6.67ns permanece dentro del sustrato. Una pequeña proporción de onda EM se filtra a través de los vértices de la geometría del sustrato, pero no es suficiente para provocar una IEM en la etiqueta RFID.

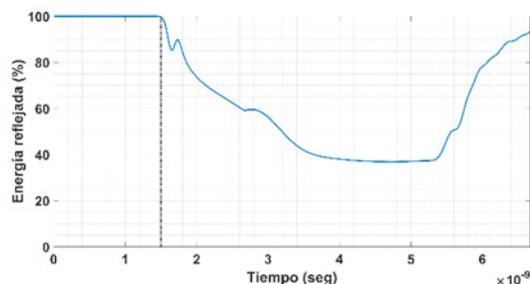


Figura 4. Porcentaje de energía reflejada por el sustrato en un tiempo total de propagación igual a 6.7ns.

APLICACIONES

El sistema RFID tiene una gran variedad de aplicaciones en diferentes áreas de la industria, comercio, farmacéuticas, etc. Los resultados alcanzados tienen la finalidad de estandarizar la amplia gama de etiquetas RFID, disminuyendo sus limitaciones de uso en cada una de las áreas mencionadas.

REFERENCIAS

Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., *et al.* (2017). A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*. 62:91-103.

Björminen, T., Sydänheimo, L., Ukkonen, L., *et al.* (2014). Advances in antenna designs for UHF RFID tags mountable on conductive items. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 56(1):79-103.

Bong, F.L., Lim, E.H., y Lo, F.L. (2017). Flexible folded-patch antenna with serrated edges for metal-mountable UHF RFID tag. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65(2):873-877.

Hecht, E. (2002). *Optic.*, San Francisco: Addison-Wesley.

Iizuka, K. (2002). *Elements of Photonics*. Toronto, Canadá: John Wiley & Sons.

Inan, U.S., y Marshall, R.A. (2011). *Numerical electromagnetics: the FDTD method*. Cambridge University Press.

Jackson, J.D. (1980). *Electrodinámica clásica*. España: Alhambra.

Liu, Q., Yu, Y., y He, S. (2013). Capacitively loaded, inductively coupled fed loop antenna with an omnidirectional radiation pattern for UHF RFID tags. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 12: 1161-1164.

Magill, M. K., Conway, G., y Scanlon, W. (2017). Tissue-Independent Implantable Antenna for In-Body Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 65: 4406-4417.

Ramo S., Whinnery, J.R., y Duzer, T.V. (2008). *Fields and waves in communication electronics*. John Wiley & Sons.

Schneider, J.B. (2010). *Understanding the finite-difference time-domain method*. School of electrical engineering and computer science Washington State University.

Soyata, T., Copeland, L., y Heinzelman, W. (2016). RF energy harvesting for embedded systems: A survey of tradeoffs and methodology. *IEEE Circuits and Systems Magazine*. 16(1). 22-5.

Tsai, M.C., Chiu, C.W., Wang, H.C., *et al.* (2013). Inductively coupled loop antenna design for UHF RFID on-body applications. *Progress In Electromagnetics Research*. 143:315-330.

Ukkonen, L., Sydänheimo, L., y Kivikoski, M. (2004). *Patch antenna with EBG ground plane and two-layer substrate for passive RFID of metallic objects*. Antennas and Propagation Society International Symposium. Pp. 93-96.

Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*. Pp. 302-307.

Zhang, J., Tian, G., Marindra, A., *et al.* (2017). A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications. *Sensors*. 17: 265.