

Diseño y análisis de un sustrato multicapa en etiquetas RFID pasivas para redirigir energía

Gerardo Arturo García Sánchez, Norma Patricia Puente Ramírez, José Ramón Rodríguez Cruz

Posgrado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Universidad Autónoma de Nuevo León
norma.puenterm@uanl.edu.mx

RESUMEN

La tecnología para identificación por radiofrecuencia (RFID) ha aumentado considerablemente en aplicaciones en las que se requiere identificar y rastrear productos. Las etiquetas pasivas presentan un desempeño dependiente del material al que son adheridas, por lo que es necesario diseñar un sustrato que optimice el coeficiente de transmisión de la señal. El presente trabajo detalla el diseño y simulación de un sustrato multicapa de materiales dieléctricos capaz de redirigir la señal en dirección a la etiqueta, para ello se obtiene la eficiencia del sistema a partir del coeficiente de transmisión de energía total. Teóricamente, se utiliza la teoría de rayos, principio de Fermat y coeficientes de Fresnel, considerando para la simulación valores reales de la etiqueta RFID pasiva y del material a utilizar a una frecuencia de operación de 915 MHz.

PALABRAS CLAVE

Etiqueta RFID, Teoría de Rayos, Ley de Snell, Coeficiente de Transmisión (T_E)

ABSTRACT

Radiofrequency identification (RFID) technology has grown up considerably in applications where product identification and traceability is required. Passive RFID tags present a performance dependent of the material where the RFID tag is adhered. Therefore, to achieve an optimum operation for this technology in any product it is necessary to design a substrate for the RFID tag that optimize the transmission coefficient of the signal. This paper details the design and simulation of a multilayer substrate made of dielectric materials to redirect towards the RFID tag. The efficiency of the system can be obtained calculating the total energy transmission coefficient. Using Ray Theory, Fermat's principle and Fresnel coefficients, considering for simulation, real values for the passive RFID tag and dielectric materials and working at a frequency of 915 MHz..

KEYWORDS

RFID Tag, Ray Theory, Snell's Law, Transmission Coefficient (T_E).

INTRODUCCIÓN

La identificación por radiofrecuencia (RFID) es una forma de comunicación inalámbrica que utiliza ondas a determinada frecuencia para identificar y rastrear objetos, en los últimos años ha ido reemplazando gradualmente a los códigos de barras UPC (Universal Product Code) o EAN (European Article Number).

Los sistemas de RFID están constituidos por un lector, una antena y una etiqueta, que opera en bandas de baja frecuencia (LF), alta frecuencia (HF), ultra alta frecuencia (UHF) e ISM (Industrial, Scientific and Medical). Las etiquetas RFID pueden ser pasivas, semipasivas o activas, las activas requieren de alguna fuente de alimentación, mientras que las pasivas no cuentan con una fuente de alimentación propia sino que captan su alimentación del campo generado por la señal RF de la lectora y la utilizan para proveer de energía al circuito integrado (C.I.). El modo de operación es el siguiente, el lector envía ondas electromagnéticas usando una antena de polarización circular u horizontal, como una señal a la cual la etiqueta debe responder dependiendo de la información del producto.¹

Una etiqueta RFID se compone de un circuito integrado conectado a una antena que se ha impreso, grabado o estampado, en la mayoría de los casos sobre un sustrato de papel o de tereftalato de polietileno (PET) que permite adherirse al producto a rastrear,¹ sin embargo, el sustrato de papel o PET cambia la frecuencia de resonancia de la señal RF.

Durante los últimos años, varios grupos de investigación se han dedicado al diseño y análisis de las antenas en las etiquetas RFID para reducir problemas de operación que provoca la interacción de la etiqueta RFID pasiva con el producto al cual es adherida,²⁻⁴ siendo un área de investigación el diseño y análisis de un sustrato capaz de minimizar lo ya planteado.

Por lo anterior, con rigor numérico, se propone el diseño de un sustrato multicapa que cambie la dirección del coeficiente de transmisión (T_E) de la señal RF que incide y traspasa la etiqueta RFID pasiva. Con el objetivo de redirigir el coeficiente de transmisión (T_E), como se ilustra en la figura 1, se calculan los ángulos de incidencia y transmisión en cada capa, las alturas, los coeficientes de

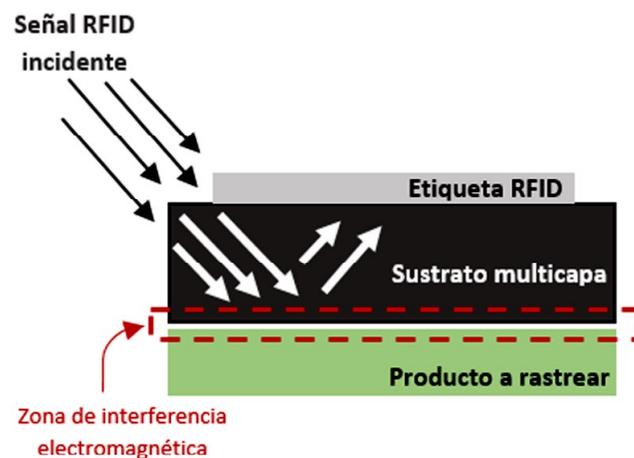


Fig. 1. Vista transversal del sistema completo de propagación de señal RFID en etiquetas.

reflexión y transmisión de campo eléctrico y el tiempo de trayectoria real en que viaja el rayo. Se utiliza la teoría de Rayos, el principio de Fermat, las ecuaciones de Fresnel e igualdades trigonométricas,⁵ para el diseño del sustrato, los cálculos numéricos se realizan en Matlab.

Aplicaciones

Conociendo que las etiquetas RFID pasivas operan a una frecuencia entre 860 – 960 MHz y que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones que incluye la gestión de inventario, antifalsificación de productos farmacéuticos y/o la configuración de dispositivos inalámbricos, el presente sustrato multicapa puede ser utilizado sobre la mayoría de los productos, para proveer el correcto funcionamiento de la tecnología RFID en sus diversas aplicaciones.

MARCO TEÓRICO

Teoría de rayos

Un rayo es una línea en el espacio que corresponde a la dirección del flujo de la energía radiante.⁶ Cuando un rayo pasa de un medio a otro, pueden ocurrir tres fenómenos: reflexión, refracción o esparcimiento, para los primeros dos fenómenos se considera la ley de Snell.

Ley de Snell

Se considera que: “Si un rayo de luz cruza la frontera de una superficie, existe una relación entre los ángulos de incidencia y transmisión, con respecto a los índices de refracción del medio 1 y del medio 2”.⁶ Como se ilustra en la figura 2, la relación es la siguiente:

$$n_2 \text{ sen } (\theta_2) = n_1 \text{ sen } (\theta_1) \quad (1)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios incidente y transmitido, respectivamente, en tanto que los ángulos θ_1 y θ_2 representan los ángulos incidente y transmitido, respectivamente.

Principio de Fermat

Se establece que la trayectoria real entre 2 puntos tomada por un haz de luz es aquella que es recorrida en el tiempo mínimo,^{6,7} por lo tanto, el tiempo de recorrido de los rayos se trabaja en base al Principio de Fermat e involucra la Ley de Snell. La siguiente ecuación presenta la relación de tiempo:

$$t = \frac{1}{c} \sum_{i=1}^m n_i S_i \quad (2)$$

donde se representa a c como la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), n_i como el índice de refracción en la i -ésima capa a analizar y S_i como el recorrido que realiza la señal dentro de la i -ésima capa.

Ecuaciones de Fresnel

Las ecuaciones de Fresnel proveen los coeficientes que permiten medir la relación entre los campos eléctricos, transmitido y reflejado, cuando una onda experimenta cambios en sus propiedades dependiendo del medio en donde se propaga. Estos coeficientes se presentan corresponden al concepto de la Ley de

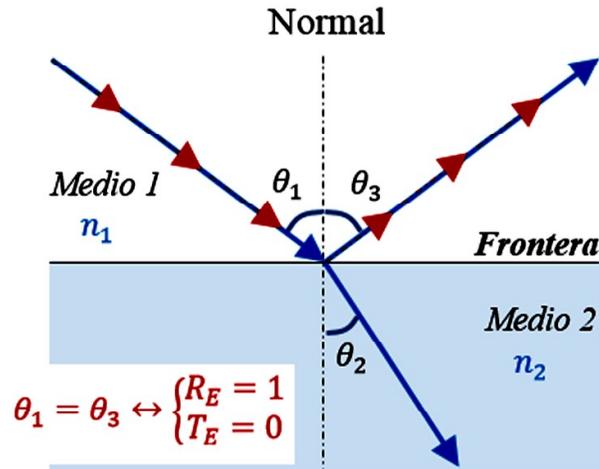


Fig. 2. Ángulos incidente (θ_1), transmitido (θ_2) y reflejado (θ_3) debido a una frontera entre 2 medios.

Snell que indica que un rayo incidente, al momento de pasar por la frontera entre el medio 1 y 2, presenta un porcentaje de energía que se refleja hacia el mismo medio 1 y el resto de la energía logra transmitirse al medio 2. Lo anterior hace referencia a coeficientes de reflexión (R_E) y transmisión (T_E), reflectancia y transmitancia, respectivamente, del campo eléctrico en donde se debe de cumplir la relación $R_E + T_E = 1$ por conservación de energía.^{6,8}

Para realizar el cálculo de los coeficientes de reflexión y transmisión se presentan las siguientes ecuaciones:

$$R_E = \frac{[n_1 \cos(\theta) - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\theta)}]^2}{[n_1 \cos(\theta) + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\theta)}]^2} \quad (3)$$

$$T_E = \frac{4n_1 \cos(\theta) \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\theta)}}{[n_1 \cos(\theta) + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(\theta)}]^2} \quad (4)$$

donde el ángulo θ representa al ángulo de incidencia y los índices de refracción n_1 y n_2 corresponden a los medios 1 y 2, respectivamente, refiérase a la figura 2. Además, cumpliendo la condición que los coeficientes de energía resulten en $R_E = 1$ y $T_E = 0$ se logra que la totalidad de energía de campo eléctrico sea reflejada en dirección al medio incidente a un ángulo reflejado, θ_3 , igual al ángulo incidente, θ_1 , respecto a la normal.

DISEÑO DEL SUSTRATO

En esta sección se presentan las características de la etiqueta RFID pasiva a utilizar, las características físicas del sustrato a diseñar y el cálculo utilizado.

Paso 1: Estructura propuesta. Consideraciones

En la figura 3 se ilustra el bosquejo del sustrato propuesto en donde se visualizan el camino del rayo (flechas entrando hasta el centro de la última capa y redireccionadas hacia la etiqueta) y la cantidad de capas a diseñar.

Se consideran los siguientes puntos:

- 1) Dimensiones de la etiqueta RFID pasiva: 50 mm (L) x 30 mm (A) del proveedor Avery Dennison⁹ con número de parte 600527.
- 2) La altura de la primera capa de sustrato resulta en la quinta parte de la medida de largo (L) de la etiqueta RFID pasiva.
- 3) Las capas del sustrato en el camino entrante (flechas dirigidas hacia el centro de la última capa del sustrato) se colocan en esa configuración, mientras que visualizando el camino final (flechas redirigidas desde el centro de la última capa del sustrato hacia el exterior) las capas del sustrato multicapa se configuran de manera encontrada, es decir, al revés respecto a la configuración de entrada. Se mantiene la última capa del sustrato sin modificación alguna para realizar el cambio de dirección de la señal RF.
- 4) El valor de L del sustrato multicapa mide 1 cm extra a lo largo de cada extremo de la etiqueta RFID.
- 5) En la capa 4, se desprecia la altura pero se considera el material.
- 6) Para realizar los cálculos, se considera una onda electromagnética no polarizada.

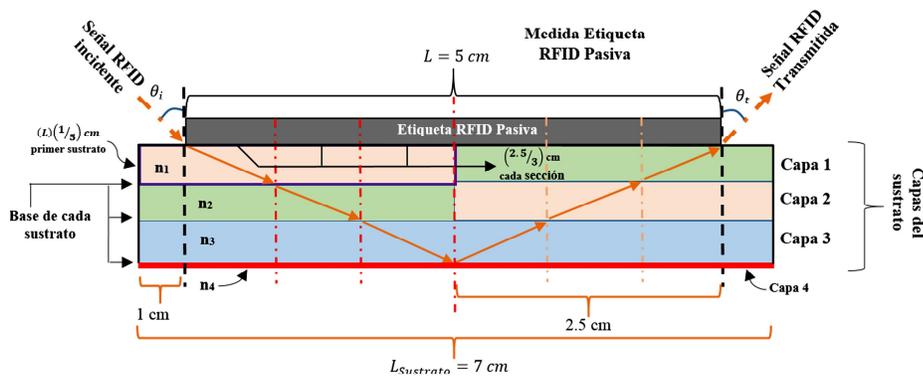


Fig. 3. Sustrato multicapa propuesto para rayos en etiquetas RFID.

Paso 2: Elección de materiales

Se considera que el material del sustrato a seleccionar sea comercial, se asume que el medio inicial en donde viaja la señal de RF es aire ($n_{aire} = 1.0$). Debido a las medidas referenciadas de la etiqueta RFID pasiva, es necesario utilizar materiales cuyo índice de refracción sea menor a 1.8,¹⁰⁻¹³ por lo cual se agrupan los siguientes índices de refracción:

Grupo #1: $n_1 = 1.433$, $n_2 = 1.47$, $n_3 = 1.49$

Grupo #2: $n_1 = 1.338$, $n_2 = 1.433$, $n_3 = 1.47$

Grupo #3: $n_1 = 1.338$, $n_2 = 1.627$, $n_3 = 1.47$

Grupo #4: $n_1 = 1.338$, $n_2 = 1.77$, $n_3 = 1.47$

El conjunto de materiales en cada grupo se selecciona por simulación numérica, considerando que cumpla con un mínimo del 50% en el coeficiente de transmisión del campo eléctrico.

Paso 3: Cálculo de número de capas de sustrato

Uno de los factores a estimar para determinar el número de capas en el diseño, es el tiempo que tarda el rayo en completar el recorrido dentro del sustrato. Otro factor es que el índice de refracción, limitado por la medida de la etiqueta RFID, pertenezca a un material comercial. Debido a lo anterior, se consideran 3 capas de sustratos y una cuarta capa que cumpla la condición $R_E = 1$ y $T_E = 0$. El cálculo del tiempo se realiza utilizando la ecuación (2).

Paso 4: Cálculo de ángulo de incidencia, de transmisión y altura de cada capa

En la figura 4 se ilustra, para un rayo incidente y una capa de sustrato, el camino (flecha punteada) que sigue el rayo hasta antes de llegar a la siguiente interfase.

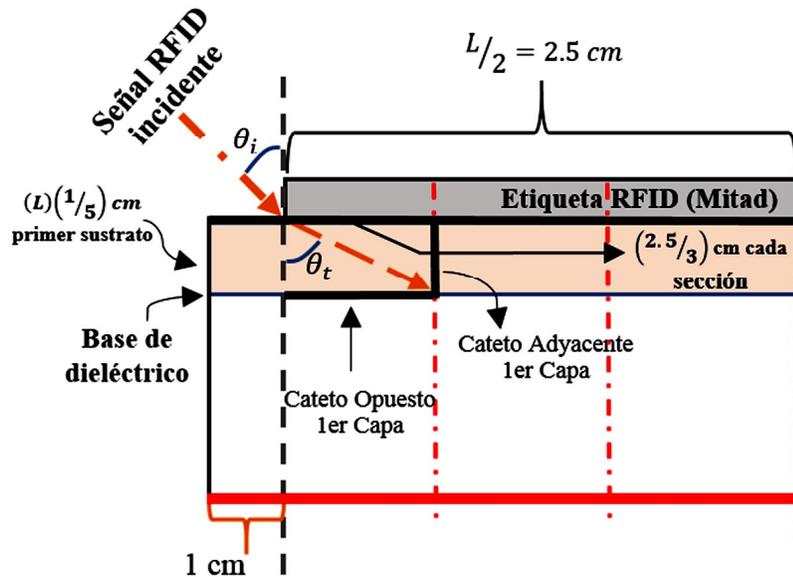


Fig. 4. Relación de medidas en el sustrato.

Refiriendo a la figura 4, se utilizan los conceptos de Ley de Snell, teorema de Pitágoras y funciones trigonométricas para realizar el cálculo del ángulo de incidencia, formado cuando el rayo incide al sustrato multicapa. Lo anterior se realiza despejando de (1) el ángulo incidente θ_i y sustituyendo las ecuaciones $sen(\theta) = co/h$ y $h = \sqrt{co^2 + ca^2}$, donde se obtiene:

$$\theta_i = sen^{-1}((n_2 co / \sqrt{ca^2 + co^2}) / n_1), \tag{5}$$

los parámetros co y ca presentados en (5) mantienen relación en la ecuación (1). Se calcula el ángulo de transmisión despejando de (1) el ángulo transmitido θ_2 , obteniendo:

$$\theta_2 = sen^{-1}((n_1 sen \theta_1) / n_2) . \tag{6}$$

Para calcular los parámetros de la segunda capa del sustrato, se considera como ángulo de incidencia al ángulo de transmisión de la primera capa, el índice de

refracción de la primera capa será el índice de refracción n_1 y así sucesivamente en siguientes capas.

Una vez descrito lo anterior, se calcula el valor de ca (altura de cada capa), despejando de (1) el seno del ángulo de transmisión ($sen(\theta_2)$) y sustituyendo $sen \theta = co/h$ y $h = \sqrt{co^2 + ca^2}$ para obtener términos en co y ca en el lado izquierdo de la ecuación resultante, por último, se obtiene ca :

$$ca = \sqrt{\left(\frac{co}{\left(\frac{n_1 \cdot sen(\theta_1)}{n_2}\right)}\right)^2 - co^2} \quad (7)$$

por último se calcula el ángulo de transmisión utilizando la ecuación (6). El mismo procedimiento se continúa hasta la última capa del sustrato.

Al considerar la capa 4, en la figura 3, se utilizan los coeficientes de las ecuaciones (3) y (4) con el objetivo de calcular un índice de refracción n_4 tal que se cumpla la condición $R_E = 1$ y $T_E = 0$, asegurando que la totalidad de la energía del campo eléctrico que incide en la capa 4, se refleje en dirección a la etiqueta e inicie el recorrido de salida.

Por tal motivo, se despeja de la ecuación (4) el índice de refracción n_2 que para este punto es el índice de refracción del material en la capa 4, n_4 , y conociendo $T_E = 0$ se obtiene la expresión:

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 \cdot sen^2(\theta)} \quad (8)$$

donde el ángulo θ representa al ángulo incidente y el índice de refracción n_1 corresponde al medio del ángulo incidente.

Una vez obtenido el índice de refracción n_2 se realiza el mismo análisis planteado, pero dirigiendo el rayo en dirección a la etiqueta, ver figura 3, considerando la información en “paso 1 - punto 3” del presente documento.

A continuación, se determina el coeficiente de transmisión (T_E) de energía total debido al sustrato multicapa, y se calcula el tiempo que tarda el rayo en completar el recorrido.

Para determinar el coeficiente (T_E) total se hace uso de las ecuaciones (3) y (4) en cada punto que el rayo atraviese una capa, es decir, cuando el rayo viaja por los caminos aire – capa 1, capa 1 – capa 2, capa 2 – capa 3, $R_E \approx 1$, capa 3 – capa 2, capa 2 – capa 1 y capa 1 – aire. El coeficiente de transmisión (T_E) de energía total será el resultado de la multiplicación de cada coeficiente T_E en cada camino descrito, medido en porcentaje.

El tiempo que el rayo viaja en el sustrato multicapa se calcula con la ecuación (2), donde el parámetro S_i representa el recorrido del rayo en una capa. Este parámetro se calcula debido a la ecuación $sen(\theta_j) = co/h_j$, donde θ_j y h_j representan respectivamente el ángulo de transmisión y parámetro S_i , de la j -ésima capa del sustrato y realizando el despeje de h_j se obtiene:

$$h_j = co / sen(\theta_j) \quad (9)$$

Una vez iterada la ecuación (9) se puede sustituir y calcular la ecuación (2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación numérica

El sustrato multicapa diseñado trabaja a un ángulo de incidencia tal que el porcentaje del coeficiente de transmisión T_E total sea el óptimo, esto se ve reflejado en la tabla 1 y figura 5. Utilizando el software Matlab, en la tabla 1 se muestran los resultados debido a cada grupo de materiales. El índice de refracción n_4 necesario para cumplir la condición $R_E = 1$ y $T_E = 0$ se determina como un valor menor a 1, además, la altura de la capa 4 no se considera dentro del diseño del sustrato multicapa.

Tabla 1. Tabla comparativa de resultados para diferentes grupos de materiales.

	Grupo #1	Grupo #2	Grupo #3	Grupo #4
n_1	1.433 Fluorita	1.338 Criolita	1.338 Criolita	1.338 Criolita
n_2	1.47 Pirex Glass	1.433 Fluorita	1.627 Flint Glass	1.77 Zafiro
n_3	1.49 Plexiglas	1.47 Pirex Glass	1.47 Pirex Glass	1.47 Pirex Glass
Ángulo incidencia inicial	66.54°	58.93°	58.93°	58.93°
Ángulo transmisión final	66.54°	58.93°	58.93°	58.93°
Altura total	3.10 cm	3.27 cm	3.50 cm	3.66 cm
Tiempo Recorrido	38.96 ns	38.94 ns	42.79 ns	45.94 ns
R_E inicio	21.98 %	10.99%	10.99 %	10.99 %
T_E inicio	78.01 %	89.00 %	89.00 %	89.00 %
R_E final	23.55 %	14.44 %	20.84 %	25.01 %
T_E final	76.44 %	85.55 %	79.15 %	74.98 %
T_E Total	59.51 %	75.22 %	66.68 %	60.02 %

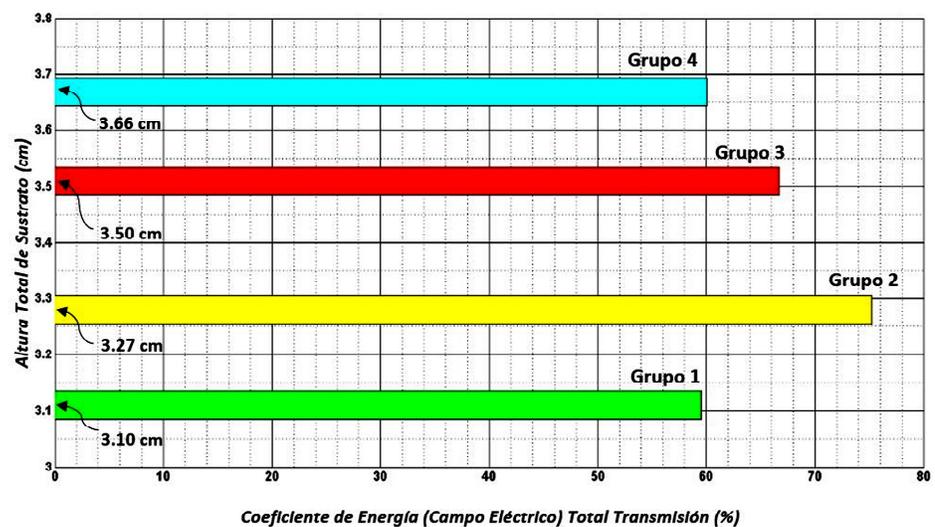


Fig. 5. Comparación del coeficiente de transmisión (T_E) de energía total para diferentes grupos de materiales.

La figura 5 ilustra un gráfico de barras que ayuda a visualizar el coeficiente de transmisión total (eje de las abscisas) y la altura total del sustrato multicapa (eje de las ordenadas) de cada grupo de materiales, con el objetivo de distinguir eficiencia en cada uno.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Refiriendo a la figura 5 se observa que el grupo #1 presenta menor altura total del sustrato multicapa a comparación de los 3 grupos restantes y el menor porcentaje de energía total transmitida de los 4 grupos.

Describiendo el grupo #4, éste presenta la mayor altura total de sustrato multicapa a comparación de los 3 grupos restantes, resultando con un porcentaje de energía total transmitida menor que los grupos #2 y #3.

Lo anteriormente descrito descarta a los grupos #1 y #4 de ser los mejores para diseñar el sustrato multicapa. El grupo #2 presenta una altura total de 3.27 cm y un porcentaje de energía total transmitida de 75.22 %, mientras que el grupo #3 presenta una altura total mayor que los grupos #1 y #2 pero con energía menor al grupo #2.

Se determina que el mejor grupo para diseñar el sustrato multicapa es el grupo #2.

Al momento de optar por teoría de Rayos no es necesaria la consideración de la frecuencia de operación de la señal, en este caso del rayo. Por tal motivo, los coeficientes de reflexión y transmisión resultantes presentan una independencia a la frecuencia.

CONCLUSIONES

Se ha diseñado un sustrato multicapa que permite controlar la transmisión de onda electromagnética por incidencia de antena RFID, basado en diferentes combinaciones de materiales.

Los resultados han mostrado que el grupo #2 de materiales es el ideal para el diseño del sustrato multicapa.

Es notable la eficiencia del coeficiente de transmisión para el grupo 2. Se concluye la utilidad de la teoría de rayos para el análisis de un sustrato multicapa de materiales dieléctricos, capaz de redireccionar el coeficiente de transmisión de campo eléctrico en dirección de la etiqueta.

REFERENCIAS

1. Finkenzeller, K., RFID Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency identification and Near-Field Communication, 3rd Edition Wiley & Sons, (2010).
2. Ma Elena de Cos, Fernando Las-Heras, Troubleshooting RFID Tags Problems with Metallic Objects Using Metamaterials, ISBN: 978-953-307-356-9, Intech, (2011).
3. Sung-Lin Chen, Ken-Huang Lin, A Slim RFID Tag Antenna Design for Metallic Object Applications, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.

- 7, (2008).
4. Sung-Lin Chen, A Miniature RFID Tag Antenna Design for Metallic Objects Applications, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, (2009).
5. Swokowski, E. W., Cole, J. A., Algebra and Trigonometry with Analytic Geometry, 12th Edition (Classical Edition) Brooks/Cole Cengage Learning, (2010).
6. Hecht, E., Optics, 4th Edition (International Edition) Addison-Wesley, (2002).
7. Saleh, B.E.A., Teich, M.C., Fundamentals of Photonics, 2nd Edition Wiley & Sons, (2007).
8. Okoshi, T., Optical Fibers, 1st Edition Academic Press, (1982).
9. <http://rfid.averydennison.com/en/home.html>.
10. Cornelis, K., Cornelius S., H., Jr., Manual de Mineralogía basado en la obra de J. D. Dana, 4ta Edición Editorial Reverté, Reimpresión (10-2003).
11. University of Liverpool. Absolute Refractive Index. Materials Teaching Educational Resources. MATTER Project. Retrieved, 10-18, (2007).
12. Burbano de Ercilla, S., Burbano García, E., García Muñoz, C., Física General, 32va. Edición Editorial Tébar, Segunda Impresión (2003).
13. Monedero Isoma, J., Simulación visual de materiales: teoría, técnicas, análisis de casos, 1era Edición Oficina de Publicacions Académique Digitals de la

