

Modelado y simulación del comportamiento real de los componentes pasivos en el dominio de la frecuencia

Passive component's real behavior models and simulation for the frequency domain

*Luis Arturo Herrera-Vega¹
Arys Carrasquilla-Batista²*

*Fecha de recepción: 3 de abril del 2014
Fecha de aprobación: 13 de agosto del 2014*

Herrera-Vega, L; Carrasquilla-Batista, A. Objective C: Modelado y simulación del comportamiento real de los componentes pasivos en el dominio de la frecuencia. *Tecnología en Marcha*. Edición Especial Movilidad Estudiantil 2014. Pág 23-30.

- 1 Estudiante de Ingeniería Electrónica. (506)-8839-1871. Correo electrónico: aherrera.vega7447@gmail.com. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Cartago, Costa Rica.
- 2 Docente e Investigadora. (506)-2550-9184, Correo electrónico: acarrasquilla@itcr.ac.cr; Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electrónica, Cartago, Costa Rica.

Palabras Clave

Capacitor; Impedancia; Inductor;
Modelos de comportamiento real;
Resistencia; Respuesta en frecuencia.

Resumen

El desarrollo de nuevos dispositivos eléctricos en nuestros tiempos implica, en primera instancia, una etapa fundamental de modelado y simulación de su comportamiento teórico en el dominio de la frecuencia, previo al desarrollo de etapas experimentales necesarias para consolidar estas ideas en un nuevo producto lo suficientemente eficaz como para ser utilizado por nuestra sociedad. En este sentido, entender el desempeño real de los componentes pasivos es indispensable para describir las características fundamentales que definen y determinan el sistema en evolución. Esencialmente, tres son los elementos eléctricos utilizados popularmente, a saber: la resistencia, el capacitor y el inductor, vitales para la creación de nuevos sensores que basan su funcionamiento en el fenómeno de inducción electromagnética.

En buena teoría, estos elementos pueden ser modelados con ecuaciones matemáticas simples, por medio de técnicas de análisis de circuitos en el estado senoidal permanente; sin embargo, en la práctica, es claro que los dispositivos presentan un comportamiento muy diferente, debido entre otros factores, a las no linealidades de los materiales empleados para su fabricación.

El presente documento pretende resumir una serie de modelos conceptuales simples desarrollados por varios autores que aproximan; de forma más precisa, el comportamiento de estos dispositivos al variar las frecuencias de operación, así como una breve descripción de los materiales utilizados en su construcción, con el objetivo de ampliar el panorama teórico para un mejor entendimiento y posterior caracterización de sistemas eléctricos.

Keywords

Capacitor; Frequency response; Inductor; Impedance; Real behavior models; Resistance.

Abstract

The development of new electrical devices in our times involves, at first, a fundamental stage of simulation modeling and theoretical behavior at the frequency domain before proceeding with the experimental steps necessary to consolidate these ideas into a new product good enough to be used in our society. In this matter, understanding the actual operation of passive components is essential to describe key characteristics that define the actual performance of the evolving system. Fundamentally, there are three most commonly used electrical elements, namely: resistance, capacitors and inductors, essential to generate new sensors that base their operation on the electromagnetic induction phenomenon.

In good theory, these elements can be modeled with simple mathematical equations by means of circuit analysis techniques in the sinusoidal permanent state, but in practice, it is clear these devices exhibit a very different behavior, due inter alia, to material's nonlinearities used for manufacturing.

This document aims to summarize a series of simple conceptual models developed by several authors that approaches, somewhat, a more precise performance characterization of these devices by varying the operating frequency, as well as a brief description of the different materials used on its construction, with the aim of expanding the theoretical overview for a better understanding and further characterization of common electrical systems.

Introducción

Los componentes pasivos son objeto de estudio profundo en los cursos introductorios de los estudiantes de ingeniería eléctrica y electrónica; donde se determina por medio tanto de un análisis físico-matemático como por técnicas circuitales en los regímenes estable y de estado senoidal permanente; su comportamiento, características y desempeño. Es así como se comprende la dinámica básica de los circuitos; y con ella, se vislumbran todas las posibles aplicaciones que se han, y seguirán desarrollándose, con el transcurso del tiempo.

Sin embargo, al trasladarse de la teoría a la práctica, fácilmente se puede comprobar que estos modelos básicos pierden su habilidad de predicción, volviéndose por tanto, un poco obsoletos. Se dice que en la realidad, todos los componentes pasivos son una mezcla de los tres elementos fundamentales, la resistencia, el inductor y el capacitor, formando así lo que comúnmente se conoce como circuitos RLC, caracterizados por una frecuencia de resonancia específica y un factor de calidad Q .

Una caracterización precisa del comportamiento de los mismos es vital para el desarrollo de nuevas tecnologías que basan su funcionamiento en el concepto de inducción electromagnética, como medidores de proximidad, o incluso sensores de flujo sanguíneo integrados dentro de implantes quirúrgicos como los actuales "stents", utilizados para tratar enfermedades cardiovasculares como la estenosis.

Existe un sinnúmero de estudios referentes a este tema, y las opiniones varían de autor a autor, atribuyendo los fenómenos observados tanto a los materiales con que los dispositivos se construyen como a la orientación que el mismo presente en el circuito final.

El presente documento pretende resumir una serie de conceptos básicos útiles para caracterizar y simular de forma apropiada; por medio de modelos que combinan estos tres componentes (cuales), el comportamiento de los elementos pasivos eléctricos con el fin de, poder desarrollar de forma aún más efectiva, cualquier diseño que implique la implementación de sistemas electrónicos para diferentes rangos de frecuencia.

Modelos de los componentes pasivos

Como se ha mencionado anteriormente, los componentes pasivos pueden caracterizarse por medio de modelos matemáticos simples, sin embargo, al momento de la práctica, su comportamiento difiere en gran medida del pronóstico teórico. A continuación se presentarán los modelos utilizados ampliamente para su representación en el dominio de la frecuencia.

La resistencia

La resistencia es la característica que le permite a los materiales conductores oponerse al flujo de corriente eléctrica a través de sí mismos. Existen dos formas básicas para caracterizar la resistencia de un material, bien por medio de sus características físicas, bien por medio de la ley de ohm.

Sin embargo, las resistencias están fabricadas con materiales no ideales, que introducen efectos no deseados en su comportamiento. Existen varios tipos de resistencias en el mercado, dependiendo del material con que se fabrican y su forma, siendo las más comunes las de hilo bobinado, las de carbono compreso y las de película fina, que generan las resistencias de montaje superficial (SMD, por sus siglas en inglés).

Los resistores comúnmente exhiben una inductancia parasita debido a su composición y las no linealidades de los materiales; sin embargo, también presentan una capacidad no deseada, causada principalmente por la interconexión en las terminales, inherente a toda red de dos puertos. Debido a esto, un modelo que aproxima eficientemente el comportamiento de la resistencia en el dominio de la frecuencia es el que se presenta en la figura 1.

Utilizando análisis circuital, la impedancia de entrada de la figura 2 puede escribirse como:

$$Z_{eq} = j\omega L_{we} + \frac{R}{j\omega RC_p + 1} \quad (1)$$

Como puede observarse en (1), la impedancia equivalente a bajas frecuencias será el valor nominal de la resistencia, y conforme la frecuencia aumenta, la reactancia comienza a jugar un papel primordial en las propiedades bajo observación. Además, es importante apreciar que el arreglo de la figura 2

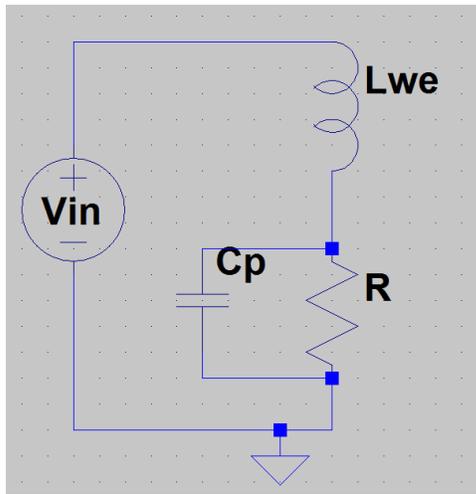


Figura 1. Modelo eléctrico de una resistencia real.

forma un circuito RLC en serie con la fuente, cuya frecuencia de resonancia esta descrita por (2) y su factor de calidad por (3):

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{we}C_p}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L_{we}}{C_p}} \quad (3)$$

El cuadro 1; a continuación, presenta las características parásitas típicas de los tipos de resistencias mencionadas anteriormente.

El capacitor.

El capacitor es un componente pasivo que almacena energía en forma electrostática. Para un capacitor de placas paralelas separadas por un dieléctrico, la capacitancia C puede calcularse por medio de sus características físicas como procede:

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \frac{A}{d}; [F] \quad (4)$$

Al igual que las resistencias, existen diferentes tipos de capacitores; clasificados por el material utilizado en su construcción y su forma, siendo los más comunes los de mica, los cerámicos y los electrolíticos.

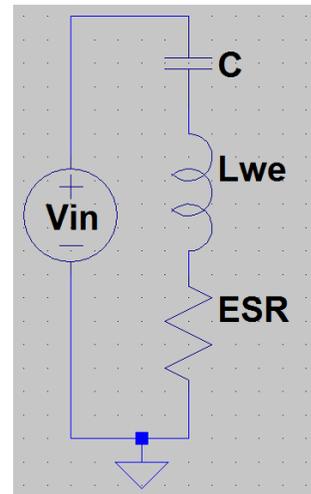


Figura 2. Modelo eléctrico de un capacitor real.

Del mismo modo, la naturaleza no ideal de los materiales produce pérdidas en el dieléctrico y efectos de conducción en las placas que se pueden modelar como una resistencia en serie ESR (equivalent series resistance, por sus siglas en ingles); junto con un inductor parásito caracterizado por la generación de campos magnéticos alrededor del dispositivo, tal y como se puede apreciar en el modelo de la figura 2.

De nuevo, un análisis circuital describe la impedancia de entrada desde la fuente como sigue:

$$Z_{eq} = ESR + j(\omega L_{we} - \frac{1}{\omega C}) \quad (5)$$

De la ecuación (5), se observa que para frecuencias bajas, la impedancia equivalente es la del capacitor nominal; sin embargo, al aumentar la frecuencia, la reactancia inductiva cobra efecto, mientras que el valor de la resistencia afecta la magnitud del factor de calidad Q . Es importante mencionar que en este modelo, la fuente generadora observa una frecuencia de resonancia en serie determinada por (6), con un factor de calidad caracterizado por (7).

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{we}C}} \quad (6)$$

$$Q = \frac{1}{ESR} \sqrt{\frac{L_{we}}{C}} \quad (7)$$

El cuadro 2 resume las características parásitas básicas de los capacitores mencionados anteriormente:

Cuadro 1. Valores característicos típicos de las resistencias más comunes.

Tipo de resistencia	R	L_{we}	C_p
Hilo Bobinado.	1 Ω - 1 G Ω	5nH - 30nH	0.1pF - 1.5pF
De carbón compreso.	1 Ω - 1 G Ω	15nH - 700nH	0.1pF - 0.8pF
De película metálica fina.	1 Ω - 1 T Ω	0.2nH - 3nH	0.01pF - 0.08pF

Cuadro 2. Valores característicos de los capacitores más comunes.

Tipo de condensador:	C	f_R	Q
De mica.	1pF - 0.1 μ F	< 10 MHz	< 500
Cerámicos.	0.5pF - 3 μ F	< 20MHz	< 1000
Electrolíticos.	0.1 μ F - 2F	< 10kHz	< 400

Utilizando los valores de la tabla anterior y las ecuaciones (6) y (7), el cuadro 3 fue tabulada como se muestra en seguida.

El inductor

A diferencia del capacitor, el inductor almacena energía por medio de efectos magnéticos. Caracterizado por su inductancia (L) debida al radio entre su flujo magnético y la corriente variable en el tiempo que lo atraviesa, como lo indica la siguiente ecuación.

$$L = \frac{\varphi}{i_L(t)}; [H] \quad (8)$$

La gran mayoría de los inductores se construyen mediante el embobinado de un cable alrededor

de un núcleo ferromagnético. Este componente pasivo es el más difícil de modelar debido a sus no linealidades como el efecto piel en alta frecuencia, la capacitancia parásita presente entre los hilos conductores próximos, la resistividad inherente del material con que se manufacturan, y la sensibilidad a los campos magnéticos producidos por inductores vecinos. El modelo que aproxima su comportamiento en frecuencia se muestra en la figura 3.

La impedancia equivalente observada desde la fuente puede describirse como sigue:

$$Z_L = \frac{(ESR + j\omega L)}{1 - \omega^2 LC_p + j\omega C_p ESR} \quad (9)$$

Observe que en este caso, la frecuencia de resonancia presente en la figura 3 es en paralelo, cuya magnitud se puede calcular a partir de la ecuación

Cuadro 3. Valores de los componentes parásitos calculados a partir del cuadro 2.

Tipo de condensador:	C	L_{we}	ESR
De mica.	1pF - 0.1 μ F	< 2.53 nH	< 31.9m Ω
Cerámicos.	0.5pF - 3 μ F	< 21.11 pH	< 15.9 m Ω
Electrolíticos.	0.1 μ F - 2F	< 2.5 mH	< 397.9 m Ω

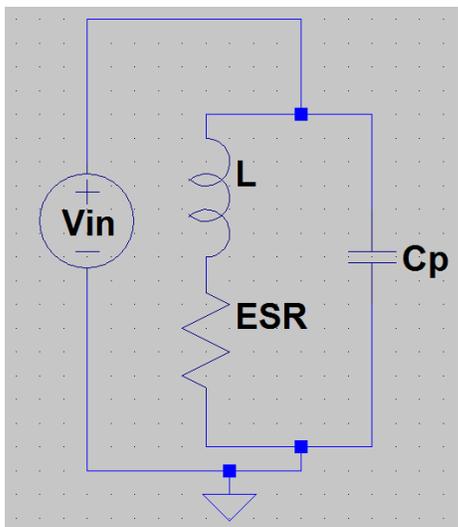


Figura 3. Modelo eléctrico de un inductor real.

(10), mientras que el factor de calidad es dado por la ecuación (11).

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LCp}} \quad (10)$$

$$Q = ESR\sqrt{\frac{Cp}{L}} \quad (11)$$

Las características típicas de los inductores con núcleo ferromagnético se resumen en el cuadro 4, a continuación.

Análisis de las simulaciones

Las ecuaciones de las impedancias características de los modelos planteados en la sección anterior fueron incorporadas en scripts para MATLAB, con

Cuadro 4. Valores típicos de los inductores de núcleo ferromagnético.

Parámetro	Valor
Q	20-100
f_r	4MHz – 900MHz
ESR	0.01Ω - 500Ω
L	0.047μH – 1mH
Cp	< 33.684pF

el objetivo de hacer un barrido en la frecuencia y observar el comportamiento de los mismos para diferentes valores característicos. En primera instancia, los valores del cuadro 1 para un resistor de hilo bobinado generaron la figura 4.

Como puede observarse de la figura anterior, al aumentar tanto el capacitor como el inductor parásito, la frecuencia propia de resonancia se mueve hacia la izquierda, como se espera según la ecuación (2). Al mismo tiempo, un aumento en el condensador parásito genera una disminución del factor de calidad, caso contrario al aumentar el inductor; tal y como lo predice la ecuación (3). Por último, se observa que al aumentar la frecuencia hasta acercarse a la de resonancia, predomina un comportamiento capacitivo, y al alejarse de la misma hacia mayores valores, el efecto predominante es inductivo.

Para un capacitor de mica y los valores característicos de los cuadros 2 y 3, la figura 5 fue construida.

Como se esperaba de la ecuación (6), un aumento en el inductor L_{we} produce un corrimiento hacia la izquierda de la frecuencia de resonancia propia del dispositivo, mientras que aumentar la resistencia equivalente en serie, no produce cambios en dicha característica, pero disminuye de forma considerable el factor de calidad del capacitor, como es de esperar según la ecuación (7). La figura 5 demuestra además que para frecuencias mayores a la de resonancia propia, el capacitor empieza a funcionar como un inductor.

Finalmente, para un inductor bobinado en un núcleo ferromagnético, con las características del cuadro 3, la impedancia modelada luce como lo muestra la figura 6.

Un aumento en ESR de la figura 6 produce un aumento en su factor de calidad, como se espera de la ecuación (11), sin afectar la auto-frecuencia de resonancia del inductor; mientras que aumentos en su capacidad parásita resultan en una disminución de la característica mencionada, como lo predice la ecuación (12). Es importante mencionar que de los tres modelos, el presente es el menos preciso, debido a la ausencia de contemplación de efectos generados por inductores vecinos, comúnmente presentes en los diseños electrónicos.

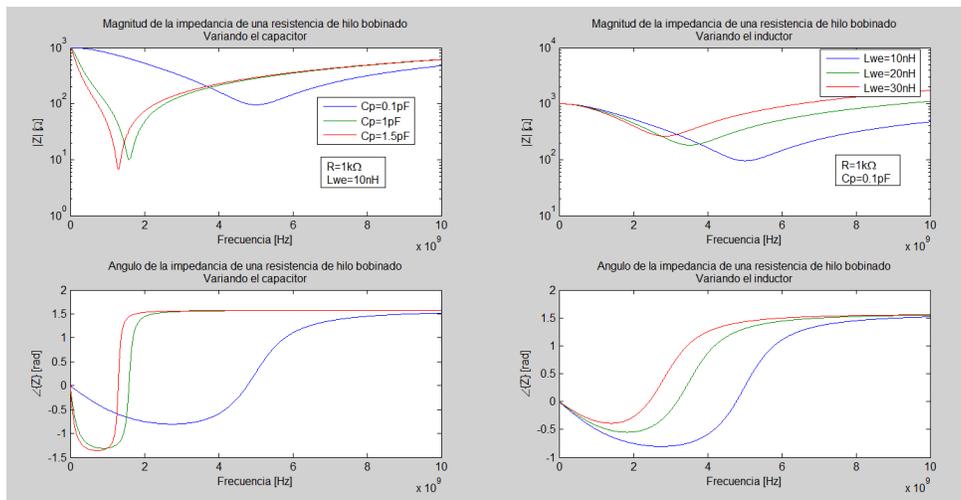


Figura 4. Impedancia característica para varios valores parásitos de una resistencia de hilo bobinado.

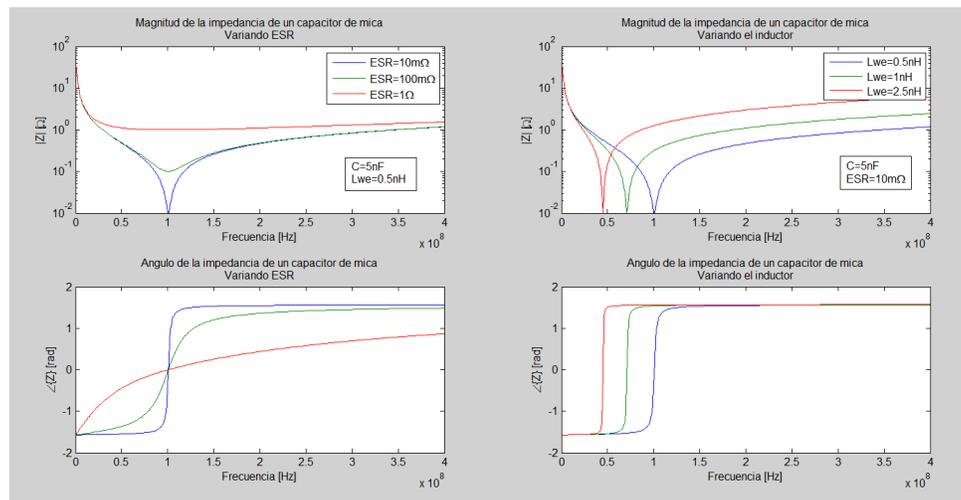


Figura 5. Impedancia característica para varios valores parásitos de un capacitor de mica.

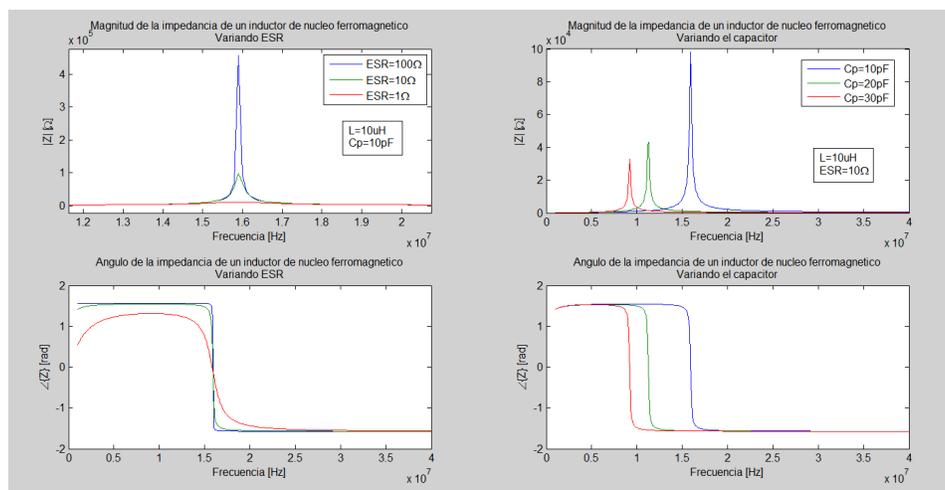


Figura 6. Impedancia característica para varios valores parásitos de un inductor de núcleo ferromagnético.

Conclusiones

Los modelos expuestos y analizados revelan que los componentes pasivos tienen un comportamiento en la frecuencia muy diferente al esperado teóricamente. Es fundamental conocer las características que gobiernan su funcionamiento con la intención de obtener una mejor descripción de un determinado diseño eléctrico. Con el objetivo de generar mejores sistemas, es primordial incluir este tipo de modelación para comprender las propiedades de los elementos bajo análisis; y sus efectos en el sistema, antes de invertir en dispositivos que de otra forma significaran un gasto innecesario de recursos.

Referencias

- Breed, G. (2006). *Fundamentals of Passive Component Behavior at High Frequencies*: Summit Technical Media.
- Floyd, T. (2000). *Principles of Electric Circuits* (Sexta ed.) New Jersey: Prentice Hall.
- Hayt, W., Kemmerly, J. & Durbin, S. (2007). *Análisis de Circuitos en Ingeniería* (Séptima Edición ed.) Mexico DF: Mc Graw Hill Interamericana.
- Kaiser, K. (2005). *Electromagnetic Compatibility Handbook* (Primera ed.) Florida: CRC Press.
- Michigan State University - College of Engineering *Electromagnetic Compatibility (EMC) Course Notes, Module 5* Recuperado el 28 de Marzo del 2014, de http://www.egr.msu.edu/em/research/goali/notes/module5_nonideal_behavior.pdf
- Niknejad, A. & Dunsmore, J. (2013). *High Frequency Passive Components* California: University of California.