



Validación experimental de modelos teóricos para el análisis de transitorios electromagnéticos

Experimental validation of theoretical models for the analysis of electromagnetic transients

Cortez, Rubén¹; Arauzo, Guido¹; Galarza, José¹

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Universidad Nacional del Centro del Perú,
Ciudad Universitaria, Huancayo, Perú

Resumen

El estudio de transitorios electromagnéticos en los sistemas eléctricos puede ser replicado utilizando modelos computacionales y ejecutarlos en softwares de simulación. Diversos circuitos que representan comportamientos de la tensión y la corriente en circuitos de corriente AC y DC pueden ser simulados fácilmente; sin embargo, la implementación experimental, utilizando componentes físicos en el laboratorio, ha sido muy poco desarrollado. En tal sentido, se desarrolló un experimento para modelar teóricamente el comportamiento de tensiones y corrientes en los circuitos de análisis usando leyes fundamentales de la electricidad, luego se comparó estos con datos experimentales. Los resultados mostraron semejanzas entre los modelos teóricos y los datos experimentales, tanto en amplitud y longitud de las frecuencias de corriente. No obstante, a falta de equipos que permitan la sincronización de eventos de apertura y cierre de los interruptores que accionaron los circuitos, presentaron complicación para el análisis.

Palabras clave: circuito eléctrico, corriente de cortocircuito, corriente de energización, transitorios electromagnéticos.

Abstract

The study of electromagnetic transients in electrical systems can be replicated using computational models and run in simulation software. Several circuits representing voltage and current behaviors in AC and DC circuits can be easily simulated; however, the experimental implementation, using physical components in the laboratory, has been very little developed. In this sense, an experiment was developed to theoretically model the behavior of voltages and currents in the analysis circuits using fundamental laws of electricity, then compared with experimental data. The results showed similarities between the theoretical models and the experimental data, both in amplitude and length of the current frequencies. However, the lack of equipment that allows the synchronization of opening and closing events of the switches that actuated the circuits, presented a complication for the analysis.

Keywords: electric circuit, short circuit current, energizing current, electromagnetic transients, electromagnetic transients, current, electromagnetic transients.

**Cómo referenciar:**

Cortez G.; Arauzo, G.; Galarza, J. (2022). Validación experimental de modelos teóricos para el análisis de transitorios electromagnéticos. *Prospectiva Universitaria*, 19(1), 56-62.

<https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2022.19.1946>.

1 Introducción

El estudio de Transitorios Electromagnéticos (TE) juntamente con otros tópicos de la Ingeniería Eléctrica representa temas de especialidad e interés en el análisis de los sistemas eléctricos de potencia. Básicamente los TE analiza el comportamiento de tensiones e intensidades en el rango de los microsegundos-milisegundos correspondientes a fenómenos naturales como descargas atmosféricas en la red eléctrica, perturbaciones eléctricas y eventos de cierre/apertura, energización/desenergización de circuitos y equipos con acoplamiento directo o a través de electrónica de potencia. Jenko (2012) propucieron facilitar la enseñanza de análisis de transitorios (resolución de ecuaciones diferenciales) a través del uso de softwares comerciales y el ensamblado de circuitos, con más énfasis en las simulaciones mediante software que permite observar las evoluciones de tensiones y corrientes.

En Ardeleanu et al. (2018) se presenta el uso de un módulo compacto para el estudio de transitorios electromagnéticos en circuitos R, L, C; la validación de la exactitud del equipo se realizó usando los resultados obtenidos de software computacional. En Goncalves et al. (2009) se estudia el comportamiento del motor de inducción cuando está, sin embargo, existe diferencias entre el modelo teórico y experimental, los autores mencionan que el mejoramiento de la carga mecánica y diferentes cargas dinámicas, así como el uso de equipos más precisos y fuentes programables harían pruebas más exitosas. En Florkowski et al. (2017) se presenta el análisis de sobretensiones en los devanados de transformadores de distribución, la simulación se realizó en EMTP/ATPDraw y comparaciones con mediciones. En Oramus et al. (2017) el análisis de la supresión de transitorios de tensión bidirec-

cionales para la limitación de arcos eléctricos en circuitos de baja tensión, se realizó pruebas experimentales y coincidieron con las simulaciones.

El presente proyecto está enfocado en el desarrollo de un conjunto de circuitos “tipo” para explicar los fenómenos transitorios sobre el mismo, estos circuitos eléctricos serán desarrollados en forma teórica a través de ecuaciones características y simulados en paquetes de ordenadores, en la etapa final estos modelos teóricos serán implementados en forma experimental en el Laboratorio de Circuitos Eléctricos y Electrónicos de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica para el posterior análisis de mediciones y verificar el comportamiento real de los circuitos eléctricos en el análisis de TE.

2 Materiales y Métodos

2.1 Procedimiento

El estudio se compuso de cuatro etapas principales:

1. Descripción teórica: se describió en forma literal el funcionamiento del circuito eléctrico bajo ensayo, acompañado de una explicación teórica del comportamiento de este en un entorno real.
2. Desarrollo de ecuaciones: se desarrollaron ecuaciones diferenciales que definieron el comportamiento del circuito eléctrico, considerando las variables de tensión y corriente en función del tiempo.
3. Simulación: se usó ecuaciones para el desarrollo del modelo en Matlab/Simulink y otros softwares especializados, que al final resultó en un circuito factible para su implementación.

4. Experimentación: se implementó el circuito eléctrico en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP), posteriormente se registraron datos de las mediciones de corriente, voltaje, resistencia y otros para su comparación con los cálculos teóricos previos.

2.2 Mediciones

Para las mediciones y toma de datos se usaron los siguientes softwares:

1. Osciloscopio digital: se usó uno de la marca PeakTech, el cual dispone de una pantalla TFT de alta resolución de 800x600 pixeles a 8 pulgadas y puertos USB,
2. EloTrain: Se usó este módulo de componentes insertables, compuesto por un conjunto de componentes eléctrico y electrónico como resistencias, bobinas, condensadores, interruptores, led, potenciómetros, etc.
3. Patch Panel: se usó este panel de conexiones universales que consta de una base de 120 puntos cada uno con 4 terminales, en la cual se montó los componentes del módulo Elotrain,
4. Fuente de alimentación: Constó de un sistema electrónico de alimentación regulable de 30 voltios a 01 amperio, acompañada de fuentes constantes de 12 y 15 V, también a 01 amperio y por último,
5. multímetro digital: se usó un multímetro de la marca SANWA de alta precisión.

2.3 Análisis de datos

Para el análisis de datos se usaron los siguientes softwares:

1. Matlab/Simulink: se usó la versión 2017b como un entorno de programación intuitivo,

2. EMTP/ATP Draw: se usó para el estudio de transitorios de tipo eléctrico, en su librería se encuentran componentes básicos como elementos R, L y C hasta componentes más complejos que facilitan el modelado de un sistema eléctrico,
3. PeakTech software (Oscilloscope): Se usó para importar los archivos de medición del osciloscopio en formato de video con información de la tasa de muestreo configurada y la escala de tiempo,

3 Resultados

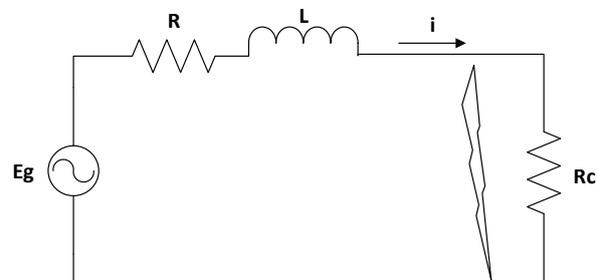
Para los circuitos en evaluación se realizó el análisis matemático (ecuaciones) y se procedió a graficar las curvas definidas en función al tiempo con la ayuda de Script en Matlab. Las comparaciones entre estos resultados preliminares y los de simulación se realizaron usando Matlab/Simulink y EMTP/ATP Draw con el entorno de programación gráfica. Los resultados preliminares arrojan una similitud en los datos teóricos y de simulación.

3.1 Primer experimento

Esta sección comprende la descripción teórica del circuito y el desarrollo de ecuaciones matemáticas. El circuito utilizado se muestra en la figura 1.

Figura 1

Diagrama de Circuito 1



En $t = t_1$, sucede un cortocircuito ($R_c = 0$), la corriente está definida según (1.1) para $t \geq t_1$.

$$i(t) = i_{\infty}(t) + [i(t = t_1^+) - i_{\infty}(t = t_1)]e^{-\frac{t}{T}} \quad (1)$$

$$i_{\infty}(t) = \frac{\sqrt{2}E_g}{\sqrt{R^2 + (wL)^2}} \sin(2\pi f t + \phi_{\infty}) \quad (2)$$

Donde: $T = \frac{L}{R}$, E_g = tensión eficaz de fase, $\phi_{\infty} = \phi_e - \arctan(\frac{wL}{R})$ y ϕ_e = ángulo de la fuente.

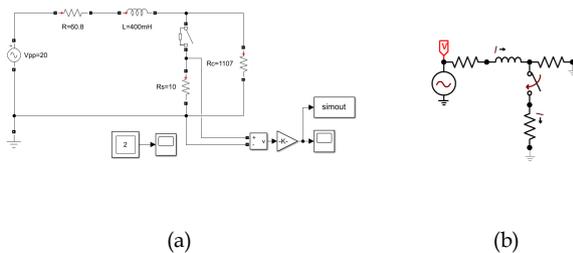
En el componente pasivo L , se cumple que: $i(t = t_1^+) = i(t = t_1^-)$. La determinación de la corriente antes del cortocircuito se da con la ecuación 3

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}E_g}{\sqrt{(R + R_c)^2 + (wL)^2}} \sin(2\pi f t + \phi_e - \arctan(\frac{wL}{R + R_c})) \quad (3)$$

$$i(t = t_1^-) = \frac{\sqrt{2}E_g}{\sqrt{(R + R_c)^2 + (wL)^2}} \sin(2\pi f t_1 + \phi_e - \arctan(\frac{wL}{R + R_c})) \quad (4)$$

La ecuación 4 muestra el comportamiento de la corriente bajo análisis en el circuito de evaluación. La simulación del circuito se realizó usando Matlab/Simulink y EMT/ATPDraw. El diagrama de bloques se muestra en la Figura 2a y 2b.

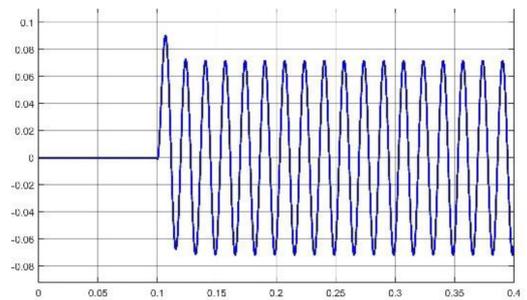
Figura 2
Simulación Circuito 1



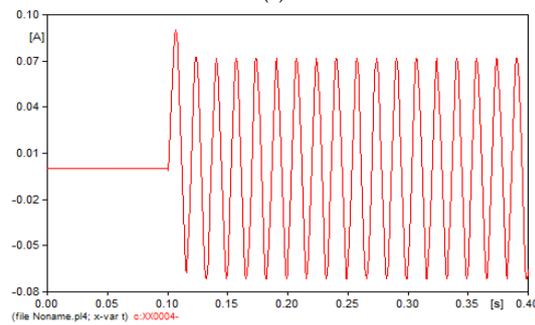
Nota. Panel (a): simulación en Matlab/Simulink, panel (b): simulación en EMT/ATPDraw

Se realizó la configuración del interruptor para dar inicio al cortocircuito en $t = 0.1$. La respuesta de la corriente de cortocircuito circula por la resistencia en serie del interruptor $R = 10$, dicha corriente se muestra en la figura 3.

Figura 3
Simulación de Corriente de Cortocircuito



(a)



(b)

Nota. Panel (a): simulación en Matlab/Simulink, panel (b): simulación en EMT/ATPDraw

Posteriormente, se realizó la fase de experimento en laboratorio, la figura 4(a) muestra el circuito ensamblado en laboratorio y la figura 4(b) la corriente de cortocircuito mostrada en laboratorio, a través de uso de su propio software se exportaron los datos hacia una hoja de Excel para sus análisis

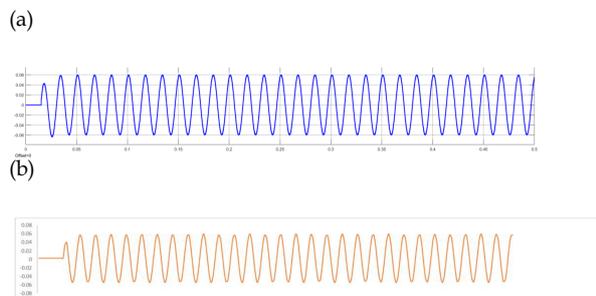
Figura 4
Experimento de Circuito



(a) (b)
Nota. Panel (a): ensamble en laboratorio, panel (b): lectura en osciloscopio

Por otro lado, la figuras 5 y 6 muestran los resultados teóricos y experimentales de la corriente de cortocircuito para el presente experimento. Estas figuras presentan gran similitud en los aspectos de amplitud y frecuencia, en tanto se concluye que el modelo teórico según las ecuaciones descritas tiene un desempeño similar en el nivel experimental.

Figura 5
Corrientes de Cortocircuito Experimental y teórica

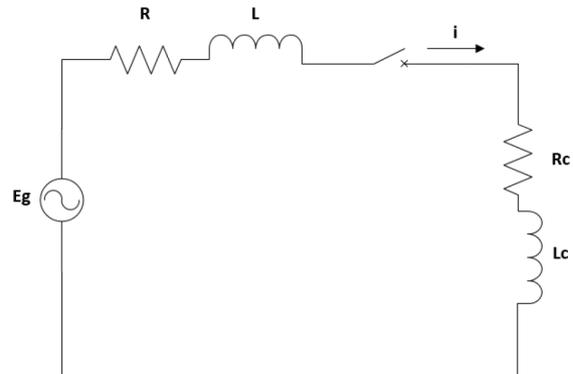


(a) (b)
Nota. Panel (a): corriente de cortocircuito teórica, panel (b): corriente de cortocircuito experimental

3.2 Segundo experimento

El segundo experimento consistió en la inclusión de una carga inductiva, tal como se indica en el diagrama de la figura 6.

Figura 6
Diagrama de Circuito 2



En $t = t_1$ sucede el cierre del interruptor, la corriente está definida según la ecuación 1 para $t \geq t_1$. Adicionalmente, al incluir una carga inductiva, la ecuación de la corriente de cortocircuito se modifica a:

$$i_{\infty}(t) = \frac{\sqrt{2}E_g}{\sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}} \sin(2\pi f t + \phi_{\infty}) \quad (5)$$

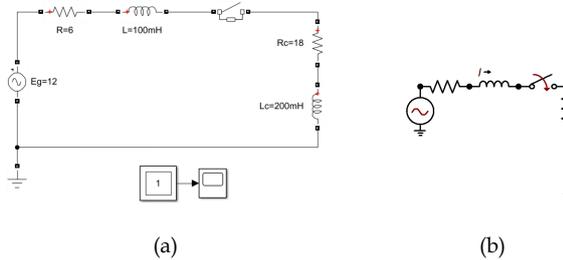
Donde, $L_{eq} = L + L_c$, $R_{eq} = R + R_c$, $T = \frac{L_{eq}}{R_{eq}}$, E_g es Tensión eficaz de fase, $\phi_{\infty} = \phi_e - \arctan(\omega \frac{L}{R})$ y ϕ_e es ángulo de la fuente.

En el componente pasivo L , se cumple que: $i(t = t_1^+) = i(t = t_1^-)$. La corriente antes del cierre del cortocircuito es nula ($i(t) = 0$)

$$i_{\infty}(t = t_1^+) = \frac{\sqrt{2}E_g}{\sqrt{R_{eq}^2 + (\omega L_{eq})^2}} \sin(2\pi f t_1 + \phi_{\infty}) \quad (6)$$

La simulación del segundo circuito se realizó usando Matlab/Simulink y EMT/ATPDraw, el diagrama se muestra en la figura 7.

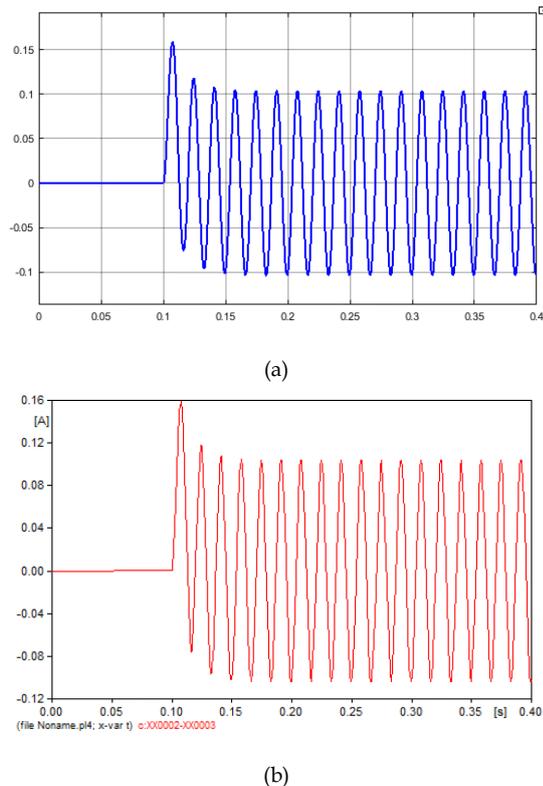
Figura 7
Simulación del Segundo Circuito



Nota. Panel (a): simulación en Matlab/Simulink, panel (b): simulación en EMTP/ATPDraw

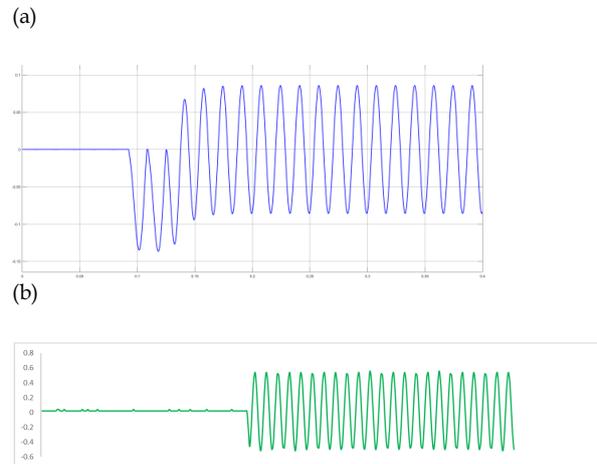
Se realizó la configuración del interruptor para cerrarlo en $t = 0.1$. La respuesta es la energización del circuito, esta puede ser observada a través de cualquiera de los componentes del circuito, la corriente a través de R_c se muestra en la figura 8.

Figura 8
Simulación de Corriente de Cortocircuito



Nota. Panel (a): simulación en Matlab/Simulink, panel (b): simulación en EMTP/ATPDraw

Figura 9
Corrientes de Cortocircuito Experimental y Teórica, Segundo Circuito



Nota. Panel (a): corriente de cortocircuito teórica, panel (b): corriente de cortocircuito experimental

A continuación, se realizó la fase de experimentación en laboratorio, que luego se registraron las señales de corriente experimental para compararla con la teórica.

Los gráficos mostrados en la figura 9 difieren en los primeros ciclos del transitorio, el problema fundamental que se observó en la fase de experimentación, es que el tiempo t cuando se realiza la acción de cierre del interruptor, este tiempo es aleatorio debido a que no se cuenta con un equipo que pueda sincronizar y registrar los tiempos de accionamiento. Este tiempo influye en el transitorio inicial de la corriente de energización, sin embargo, en el estado estable si existió coincidencia de ambas señales.

4 Discusión

Los resultados muestran de forma teórica usando las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento del circuito en análisis, luego se realizaron montajes de los circuitos en el Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Para los experimentos se usaron componentes eléctricos con tolerancia de 5% (resistencias de carbón), instrumen-

tos digitales los cuales tiene una precisión alta (error de 0.7%), fuentes en AC y el Osciloscopio PeakTeach. Los resultados de las corrientes se adquieren usando el Osciloscopio con una ventana de tiempo actual, finalmente se debe mencionar que los resultados tienen diferencia a los teóricos debido a la falta de sincronización de las señales medidas.

5 Conclusiones

En este trabajo se realizaron las simulaciones teóricas y experimentales de dos circuitos eléctricos para analizar la corriente de cortocircuito y la corriente de energización, para la fase experimental se utilizó los equipos del Laboratorio de Circuitos Eléctricos de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, las señales adquiridas en los experimentos tienen similitud con los valores teóricos, en lo que respecta a frecuencia y amplitud de señales.

Referencias

- Ardeleanu, M.-E., Stănescu, D.-G., Drăghici, M., & Preoteasa, V. (2018). A Compact Experimental Device for the Study of Transient Mode in Electrical Circuits. *2018 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ISFEE.2018.8742458>
- Florkowski, M., Furgał, J., & Kuniewski, M. (2017). Simulation of Overvoltages Transferred through Transformers in EMTP-ATP Software. *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967285>
- Goncalves, J., Baptista, J., Neves, L., & Oliveira, F. T. (2009). Simulation of power quality disturbances effects on an induction motor with ATP/EMTP. Comparison with laboratory measurements. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1, 596-602. <https://doi.org/10.24084/repqj07.446>
- Jenko, M. (2012). Development of an Analog Simulator for the Transient Analysis of Electric Circuits, with the Aim of Teaching Circuit Phenomena by Simulating Equations. *2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO*, 60-65. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6240614>
- Oramus, P., Chmielewski, T., Kuczek, T., & Florkowski, M. (2017). Application of Bidirectional Transient Voltage Suppressor for Electric Arc Suppression in LV Switches - Simulation and Laboratory Case Study. *2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/PAEE.2017.8008992>