

Bewley's Lattice Diagram Implementation by Using ATP/EMTP

V. Gonzalez, R. Cardenas, *Student Member, IEEE*, V. Torres, *Senior Member, IEEE*, and M. Paternina, *Member, IEEE*,

Abstract—Transients caused by lightning that strikes to transmission lines, switching operations or faults, are fundamentals in selecting equipment insulation levels and protection devices. Thus, studies of electromagnetic transients on transmission lines have demonstrated that when a change on the normal operation of the system takes place, voltage and currents traveling waves appear and these are reflected and refracted in the transmission line. In this paper, an ATPDraw™-embedded simulator is developed to observe the propagation of voltage and current traveling waves along the transmission lines. The Bewley's Lattice diagram is used into the simulator to show in a comprehensive manner the behavior of the traveling waves. The behavior of the traveling waves is strictly depending on the reflection and refraction coefficients in the sending and receiving nodes, in turn these coefficients are depending on the transmission network's parameters, such as the characteristic impedance and the impedance of the sending and receiving ends.

Index Terms—ATPDraw™, Transients, Transmission line, Traveling wave.

I. INTRODUCCIÓN

Las ondas viajeras son impulsos electromagnéticos de alta frecuencia tanto de corriente como de voltaje, los cuales se originan cuando ocurre una perturbación. Por ejemplo, cuando ocurre una falla en una línea de transmisión, dichas ondas se propagan hacia los dos extremos de envío y recepción, hasta que llegan a una discontinuidad o un equipo de una subestación, como un transformador u otra línea de diferentes características, en la cual se dividen en una onda transmitida y otra reflejada. Este fenómeno se representa con los diagramas de Lattice de Bewley, considerados como la herramienta más utilizada [1]. En este trabajo se presenta un algoritmo para determinar la distancia en la cual se produce un evento transitorio con el diagrama Lattice de Bewley en ATPDraw™ [2]. El diagrama Lattice de Bewley desarrollado por L. V. Bewley [1] organiza las reflexiones que se producen durante los transitorios de la línea de transmisión. Para el diagrama de Bewley la escala vertical representa el tiempo t en unidades de s y las líneas diagonales representan las ondas viajeras. Cada reflexión se determina multiplicando la onda incidente que llega a un final por el coeficiente de reflexión en ese extremo, como se ilustra en la Fig. 1. La tensión $u(x, t)$ en cualquier punto x y t en el diagrama se determina agregando todos los términos directamente sobre ese punto [3]. Para ejemplificar lo expuesto anteriormente, la Fig. 1 supone una perturbación a una distancia x en una línea de transmisión, donde se puede apreciar que las señales vistas

desde la terminal A, permiten obtener información del fenómeno de onda viajera. Adicionalmente es posible observar en la Fig. 1, cuando ocurre la perturbación en el punto intermedio de la línea, una onda de voltaje V_a se propaga hacia la terminal A, recorriendo una distancia d_a en un tiempo t_{a1} y otra onda de voltaje V_b se propaga hacia la terminal B, recorriendo una distancia d_b en un tiempo t_{b1} , cuando esta última llega a la terminal B se refleja y regresa al punto donde se encuentra la perturbación. En ese punto esta onda de voltaje se refleja y regresa en un tiempo t_{b2} y otra onda se refracta y se dirige hacia la terminal A en un tiempo t_{a2} y así sucesivamente.

La importancia de analizar las ondas viajeras generadas por perturbaciones como fallas o descargas atmosféricas en las líneas de transmisión es que pueden usarse como criterio para su detección, localización y posterior liberación [4]. En los últimos diez años, con el desarrollo de técnicas de procesamiento de señales se han implementado metodologías diversas que permiten proteger las líneas de transmisión con una mayor velocidad y precisión. Por ejemplo, una protección de línea de transmisión de dos terminales basada en la utilización de ondas viajeras en la que solo se toma en cuenta el primer frente de onda en llegar a cada terminal de línea es propuesta en [5]. En [6] se desarrolla un algoritmo que depende solamente de la diferencia

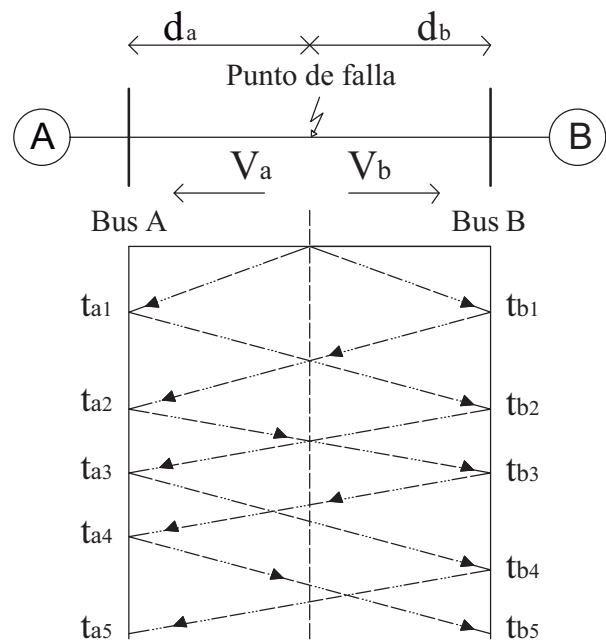


Fig. 1. Representación del diagrama Lattice de Bewley cuando ocurre una falla en la mitad de una línea de transmisión.

de tiempo entre la primera onda viajera incidente y la reflexión sucesiva desde el punto de falla en ambas terminales de la línea, se toman en cuenta los coeficientes de reflexión y de refracción para estimar los tiempos de llegada de las ondas. Un algoritmo es presentado en [7] el cual es basado en ondas viajeras para la localización de fallas en líneas de transmisión híbridas. Las líneas de transmisión híbridas pueden tener dos o más segmentos con diferentes velocidades de propagación, lo que resulta en errores de localización, este método toma en cuenta los errores que se producen al tomar una misma velocidad de propagación y los incluye en el algoritmo para estimar de una manera precisa la falla. En [8] se describen los principales fundamentos de los métodos de localización de falla por onda viajera basados en transformada wavelet, y se hace una comparación entre los métodos que utilizan información de una terminal con los que utilizan información de ambas terminales de la línea. El desempeño de un método de localización de fallas basado en la onda viajera entre dos terminales de líneas de transmisión de media longitud de onda a través de simulaciones en ATP/EMTPTM es investigado en [9]. Un método basado en ondas viajeras se presenta en [10] el cual que permite la sincronización de la estampa de tiempo de los datos tomados en dos terminales de la línea de transmisión para la ubicación precisa de un disturbio en la misma.

En [11] se llega a la conclusión que la utilización del diagrama Lattice de Bewley para la detección y localización de fallas es poco explotado para el desarrollo de herramientas con este fin; no obstante, los autores ratifican que tiene una gran área de oportunidad. Un algoritmo para visualizar las ondas viajeras que ocurren en los sistemas eléctricos debido a la conmutación o falla de equipos es discutido en [12]. El perfil de tensión se convierte en una imagen coloreada en la que se asignan diferentes colores a las señales de fase según su intensidad y se hace una relación con el diagrama Lattice de Bewley. Un método que permite simular los voltajes transitorios que ocurren en las líneas de transmisión utilizando ondas viajeras para su desarrollo es reportado en [13]. Específicamente, las simulaciones que realizan se utilizan los coeficientes de reflexión para determinar el voltaje en cada terminal de la línea. En [14] se hizo un programa utilizando MATLABTM para determinar el diagrama de Lattice de Bewley con el que se observan las ondas reflejadas en cada terminal de la línea de transmisión. La codificación de este algoritmo se enfoca en un estudio de caso específico. Por lo tanto, la utilización de diagramas de Lattice de Bewley para la detección de fallas ha tenido diversas aplicaciones. Sin embargo, no se ha explorado profundamente en un software adecuado para el estudio de transitorios como es ATP/EMTPTM.

En este trabajo se expone la metodología para la visualización y detección de ondas viajeras en el diagrama de Lattice de Bewley usando ATP/EMTPTM, además se propone una herramienta de visualización potencialmente práctica y novedosa. Las principales contribuciones de este artículo son:

- La creación de una herramienta para propósitos educacionales en los tópicos de localización de fallas en sistemas eléctricos, mediante el diagrama lattice de Bewley.
- La efectividad de la herramienta propuesta se demuestra,

mediante la validación de resultados del método propuesto.

- Se determinan matemáticamente los coeficientes de reflexión, tanto de envío como de recepción, en una onda viajera a través de la línea de transmisión de parámetros distribuidos, considerando la solución Laplaciana para el modelo universal de línea.
- La propuesta del artículo se centra en el desarrollo de una herramienta para la visualización de la transición temporal de ondas de voltaje y corriente durante su propagación, lo cual es implementa en TACS (por sus siglas del inglés para *Transient Analysis Control System*) y *MODELS* del software ATP/EMTPTM.

II. CONCEPTOS DE ONDAS VIAJERAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN SIN PÉRDIDAS

Para entender el comportamiento de las ondas viajeras en líneas de transmisión, es necesario llevar a cabo el estudio de circuitos eléctricos para una línea de transmisión y aplicar las leyes de Kirchhoff. En la Fig. 2, se ilustra una línea de transmisión sin pérdidas, la cual consiste en una fase y dos hilos, de longitud l y una impedancia de carga $Z_R(s)$. Además, se observa una impedancia de Thévenin $Z_S(s)$ en el nodo de envío y una impedancia característica Z_C asociadas a la línea. Esta suposición de línea sin pérdidas es ampliamente utilizada en sistemas de potencia para estudios de transitorios en líneas de transmisión. Además se resumen las condiciones para el estudio de propagación, cuando se presenta un corto circuito y un circuito abierto en la línea de transmisión de parámetros distribuidos.

De acuerdo con [15], [16], [17] las ecuaciones que describen el comportamiento de la línea de transmisión sin pérdidas con parámetros distribuidos son:

$$u_x(x, t) = -Li_t(x, t) \quad (1)$$

$$i_x(x, t) = -Cu_t(x, t) \quad (2)$$

Donde $u_x(x, t)$ e $i_x(x, t)$ son las derivadas parciales respecto a x del voltaje y la corriente respectivamente, $u_t(x, t)$, e $i_t(x, t)$ son las derivadas parciales respecto a t de la tensión y de la corriente respectivamente y L y C son la inductancia y capacitancia de la línea de transmisión. Las ecuaciones (1) y (2) son reducidas a la ecuación de onda viajera de voltaje siguiente.

$$u_{tt}(x, t) - v^2 u_{xx}(x, t) = 0 \quad (3)$$

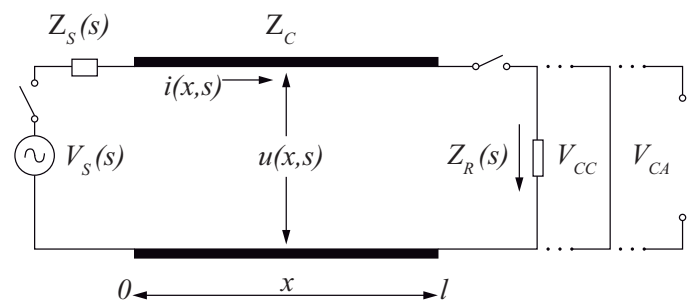


Fig. 2. Línea de transmisión en el dominio de Laplace.

Según lo indicado por [15], se asume que para la solución de la ecuación (3) las condiciones iniciales son iguales a cero por lo que la solución general queda como:

$$u(x, s) = A(s)e^{-\frac{sx}{v}} + B(s)e^{\frac{sx}{v}} \quad (4)$$

Sin embargo, cuando las condiciones iniciales son diferentes de cero, de acuerdo con [18] la solución general de (3) en el dominio de Laplace tiene la forma:

$$u(x, s) = A(s)e^{-\frac{s}{v}x} + B(s)e^{\frac{s}{v}x} - \frac{1}{sv} \int_0^x [su(y, 0) + u_t(y, 0)] \left(\frac{e^{\frac{s}{v}x} - e^{-\frac{s}{v}x}}{2} \right) dy \quad (5)$$

Considerando las siguientes condiciones de frontera de la línea de transmisión

$$\begin{aligned} u(0, s) &= V_S(s) - Z_S(s)i(0, s) \\ u(l, s) &= Z_R(s)i(l, s) \end{aligned} \quad (6)$$

Se obtiene como resultado [18]:

$$u(x, s) = \frac{V_S(s)(1 - \Gamma_S(s))}{2(1 - \Gamma_S(s)\Gamma_R(s)e^{\frac{2sl}{v}})} \left(e^{-\frac{sx}{v}} + \Gamma_R(s)e^{-\frac{2sl}{v}}e^{\frac{sx}{v}} \right) \quad (7)$$

Donde $Z_C = (L/C)^{1/2}$ es la impedancia característica de la línea y $\Gamma_S(s)$ y $\Gamma_R(s)$ son los coeficientes de reflexión en los nodos de envío y recepción, respectivamente [15], [16], [17].

$$\Gamma_S(s) = \frac{Z_S(s) - Z_C}{Z_S(s) + Z_C} \quad (8)$$

$$\Gamma_R(s) = \frac{Z_R(s) - Z_C}{Z_R(s) + Z_C} \quad (9)$$

La solución de la ecuación de la onda viajera permite conocer todos los parámetros que intervienen en este fenómeno. Por otra parte, los coeficientes de reflexión (8) y (9) en el dominio de Laplace dependen del fenómeno a analizar, como son una energización de la línea, una falla ó conexión de una carga. Estas condiciones deben ser tomadas en cuenta y sustituidas en (7) y posteriormente, debe ser transformada al dominio del tiempo por medio de una transformada inversa de Laplace para describir el comportamiento de las ondas de voltaje y corriente a través de la línea. En este trabajo se utiliza el software ATP/EMTP™ el cual permite observar el comportamiento de las ondas viajeras en las simulaciones realizadas en el dominio del tiempo.

Con respecto a [18], la solución de la ecuación general de (7) en el dominio del tiempo se representa para voltaje $u(x, t)$ y corriente $i(x, t)$ como:

$$u(x, t) = u^+(t - \frac{x}{v}) + u^-(t + \frac{x}{v}) \quad (10)$$

$$i(x, t) = i^+(t - \frac{x}{v}) + i^-(t + \frac{x}{v}) \quad (11)$$

Donde las funciones u^+ , u^- , i^+ e i^- son evaluadas a partir de las condiciones de frontera en (6).

III. REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LAS ONDAS VIAJERAS

Cuando una onda electromagnética se propaga a lo largo de una línea de transmisión con una cierta impedancia característica, existe una relación fija entre las ondas de voltaje y de corriente. Pero, si la onda llega a una discontinuidad, como una falla en la línea o un punto donde cambia la impedancia característica, debido a la falta de coincidencia en la impedancia característica, debe producirse un ajuste de la tensión y de corriente. En la discontinuidad, una parte de la energía se refleja y otra parte se refracta. Además, la cantidad total de energía en la onda electromagnética permanece constante, si se desprecian las pérdidas [19]. Se observa en la Fig. 3 un esquema que ejemplifica el comportamiento de las ondas de voltaje y corriente cuando llegan a una discontinuidad, u^+ y u^- son representados por V^+ y V^- . En la Fig. 3(a) se presentan las ondas viajeras asociadas con el voltaje y la corriente, llegando a una discontinuidad, en este caso representada por un bus. Mientras que en la Fig. 3(b) se ilustra como la onda de voltaje V_A^+ se refleja, resultando dos ondas refractadas V_B^+ y V_C^+ que viajan a través de las Líneas B y C respectivamente. Asimismo, la Fig. 3(c) presenta la reflexión y refracción de la onda de corriente.

Un ejemplo del comportamiento de ondas viajera es cuando se energiza una línea de transmisión que está en circuito abierto como lo sugiere la Fig. 2. Supongamos que $Z_S = Z_C$ y $Z_R \rightarrow \infty$, por lo que en la energización se inician una onda de voltaje y una onda de corriente en el extremo de envío. La onda de voltaje viaja hasta el extremo receptor donde $\Gamma_R = 1$ la onda de voltaje incidente se refleja y la onda de corriente también es reflejada en sentido opuesto a la onda de corriente incidente. Estas ondas que se reflejan en el extremo receptor se superponen a las ondas que viajan hacia adelante desde el extremo emisor.

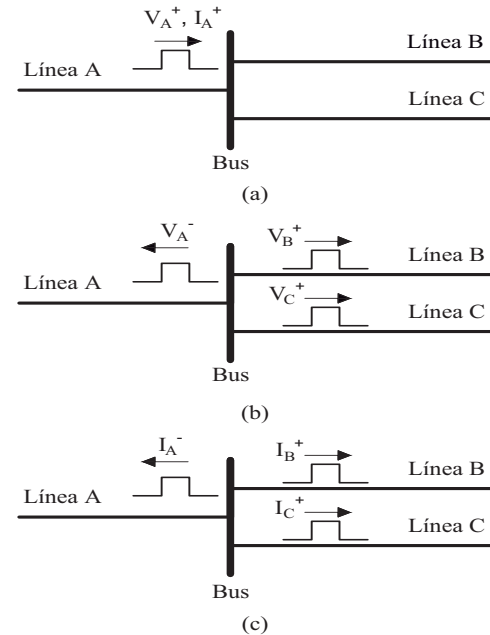


Fig. 3. Reflexión y refracción de ondas de voltaje y corriente en una discontinuidad representada por un Bus. (a) Ondas incidentes; (b) ondas reflejadas y refractadas de voltaje; y (c) ondas reflejadas y refractadas de corriente.

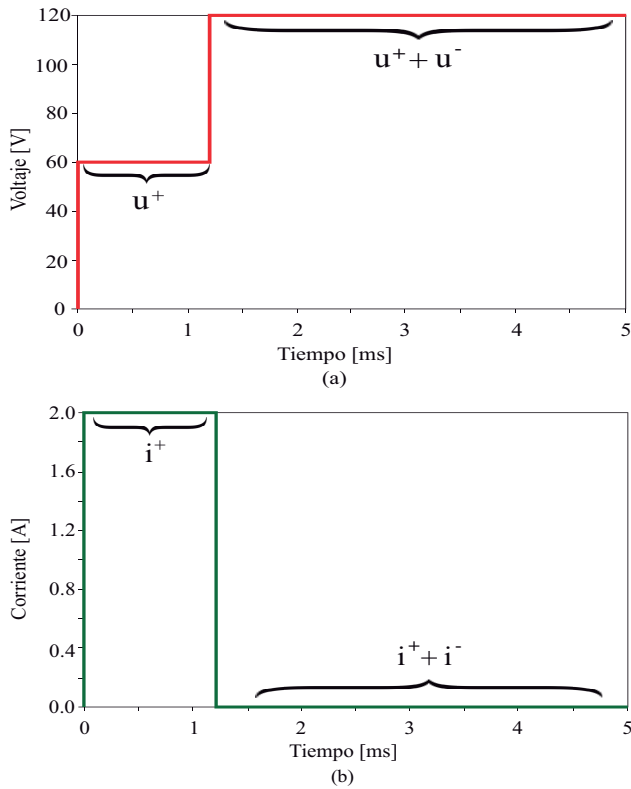


Fig. 4. Ondas de voltaje y corriente cuando se tiene un circuito abierto en una línea de transmisión representada en la Fig. 2. (a) Ondas de voltaje incidentes y reflejadas; (b) ondas de corriente incidentes y reflejadas.

Las ondas no continúan reflejándose en el extremo emisor porque la impedancia de la fuente es igual a la de la línea; es decir, $\Gamma_g = 0$.

Es evidente en la Fig. 4(a) que el voltaje de circuito abierto (V_{CA}) en estado estable es resultado de la suma de la onda incidente y la reflejada, las cuales tienen la misma magnitud y sentido. Mientras que la corriente en estado estable de circuito abierto, ilustrada en la Fig. 4(b), es resultado de las ondas incidente y reflejada que tienen la misma magnitud pero sentido opuesto.

Para la condición de la energización de una línea de transmisión en corto circuito con $Z_S = Z_C$ y $Z_R \rightarrow 0$. De la misma manera que en el caso anterior, la onda de voltaje viaja hasta el extremo receptor donde ahora $\Gamma_R = -1$ por consiguiente, la onda de voltaje incidente se refleja con signo negativo y la onda de corriente es reflejada con el mismo signo que la onda incidente. Estas ondas que se reflejan en el extremo receptor se superponen a las ondas que viajan hacia adelante desde el extremo emisor. De modo que, para una línea terminada en corto circuito, el voltaje de la onda hacia atrás (o reflejada) es igual y opuesto al voltaje de la onda hacia adelante (o incidente) por lo que el voltaje de corto circuito (V_{CC}) en estado estable es igual a cero, como es representado en la Fig. 5(a). Ya que la onda de corriente reflejada es igual a la onda incidente en magnitud y signo, por consiguiente, la suma de ambas ondas resulta en una corriente de 4 A, como se observa en la Fig. 5(b).

Con el propósito de mostrar el comportamiento de la onda

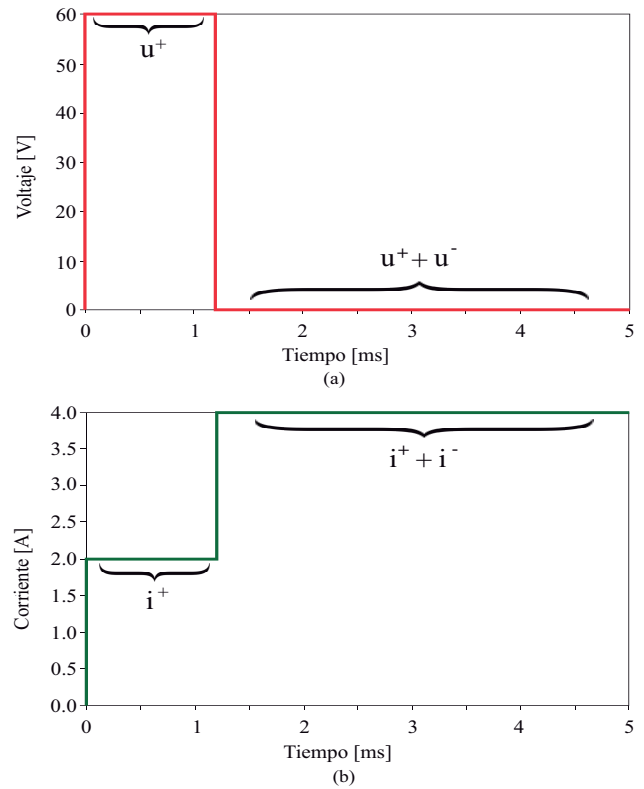


Fig. 5. Ondas de voltaje y corriente cuando se tiene un corto circuito en una línea de transmisión representada en la Fig. 2. (a) Ondas de voltaje incidentes y reflejadas; y (b) ondas de corriente incidentes y reflejadas.

viajera de voltaje en un sistema de transmisión cuando existe un coeficiente de reflexión distinto de cero se simuló en ATP/EMTP™ el siguiente ejercicio tomado de [20].

Se considera una línea de transmisión con una carga resistiva con valor de $Z_R = 90 \Omega$ conectada en un extremo de la línea y además la impedancia característica de la línea es $Z_C = 30 \Omega$ por lo que usando (9) el coeficiente de reflexión en el nodo de recepción es:

$$\Gamma_R(s) = \frac{Z_R(s) - Z_C}{Z_R(s) + Z_C} = \frac{1}{2}$$

Por otra parte, cuando $Z_S = 0 \Omega$, entonces $\Gamma_S = -1$.

La Fig. 6(a) exhibe el diagrama Lattice de Bewley que se encuentra en [20], aquí se expone el comportamiento de las ondas de voltaje y su magnitud en cada terminal de la línea. Se puede apreciar que la onda de voltaje se multiplica por el coeficiente de reflexión al llegar a cada terminal. La simulación realizada con la herramienta propuesta en ATP/EMTP™ es presentada en la Fig. 6(b) y es evidente que corresponde a lo expuesto en [20], con $T = 0.1 \text{ ms}$.

Las ondas de voltaje en el tiempo son presentadas en la Fig. 7. Cuando se le aplica un voltaje en corriente directa de 120 V y de acuerdo con el coeficiente de reflexión, la onda se va propagando con distintas magnitudes de voltaje al llegar a cada terminal. En la Fig. 7 se aprecia que las magnitudes de voltaje corresponden con el diagrama Lattice de Bewley de la Fig. 6(a) y

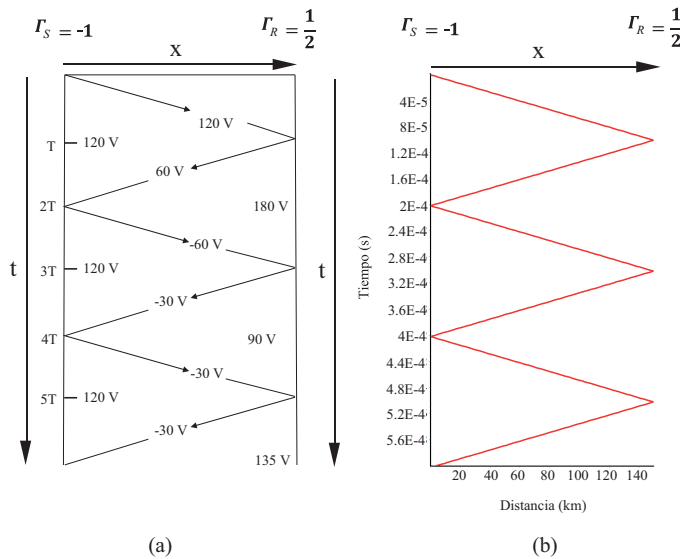


Fig. 6. Diagrama Lattice de Bewley del circuito de prueba. (a) Representación teórica del diagrama Lattice de Bewley; y (b) simulación del diagrama Lattice de Bewley en ATP/EMTP™.

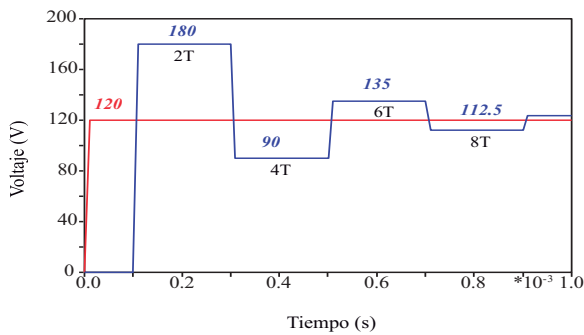


Fig. 7. Gráfica de las ondas viajeras de voltaje en el circuito de prueba.

la constante de tiempo T corresponde con el diagrama expuesto en la Fig. 6(b).

IV. VISUALIZACIÓN DEL DIAGRAMA LATTICE DE BEWLEY EN ATP/EMTP

Para la visualización del diagrama Lattice de Bewley se desarrollan algunos grupos de bloques con TACS y MODELS del software ATP/EMTP™, en la Fig. 8 se expone un esquema para explicar el contenido de la propuesta. Primero se presentan los dos bloques principales para la visualización del diagrama Lattice de Bewley como se muestra en la parte superior de la Fig. 8. Posteriormente, se detalla el bloque de TACS-MODELS compuesto por un bloque de la sección TACS y un bloque de MODELS como se observa en la mitad de la Fig. 8. Después, en la parte inferior de la Fig. 8 se detalla el bloque de TACS, cuya función principal es integrar numéricamente, a través del bloque ACC, el voltaje reflejado utilizando una fuente de voltaje constante con una alta impedancia.

Para seleccionar el diagrama de salida se utiliza un bloque de MODELS, el cual se selecciona: en opción 0 para observar la distancia de la perturbación con el diagrama Lattice de Bewley,

en opción 1 para observar el comportamiento del voltaje y en opción 2 para observar el voltaje junto con el diagrama Lattice de Bewley. La codificación en MODELS se ilustra en el Algoritmo 1.

Finalmente, las señales son graficadas en el bloque del Relé cuyo MODELS permite ilustrar el diagrama con la lectura del resultado de las simulaciones y es guardado en archivos .PL4. La interfaz expuesta por el bloque del relevador se puede ver en la Fig. 9.

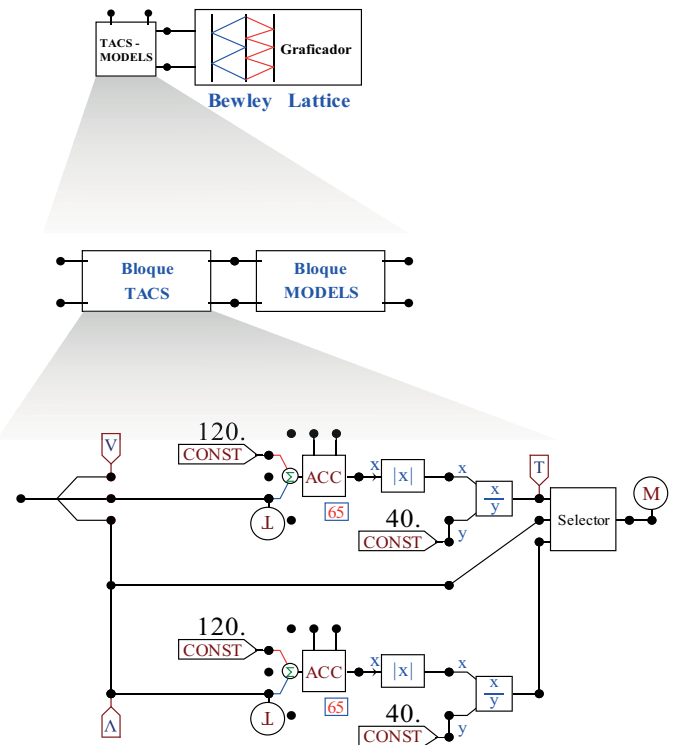


Fig. 8. Detalle del visualizador con TACS y MODELS en ATP/EMTP™.

Algoritmo 1 Codificación en MODELS del selector.

```

1: Entradas:  $d_1, S_1, S_2$  y  $S_3$ .
2: Salida:  $O_1$ .
3:  $O_1 := 0$ 
4: if  $d_1 = 0$  then
5:   then
6:      $O_1 := S_1$ 
7: else
8:   if  $d_1 = 1$  then
9:     then
10:       $O_1 := S_2$ 
11:   else
12:     if  $d_1 = 2$  then
13:       then
14:          $O_1 := S_3$ 
15:     end if
16:   end if
17: end if
18: return  $O_1$ 

```

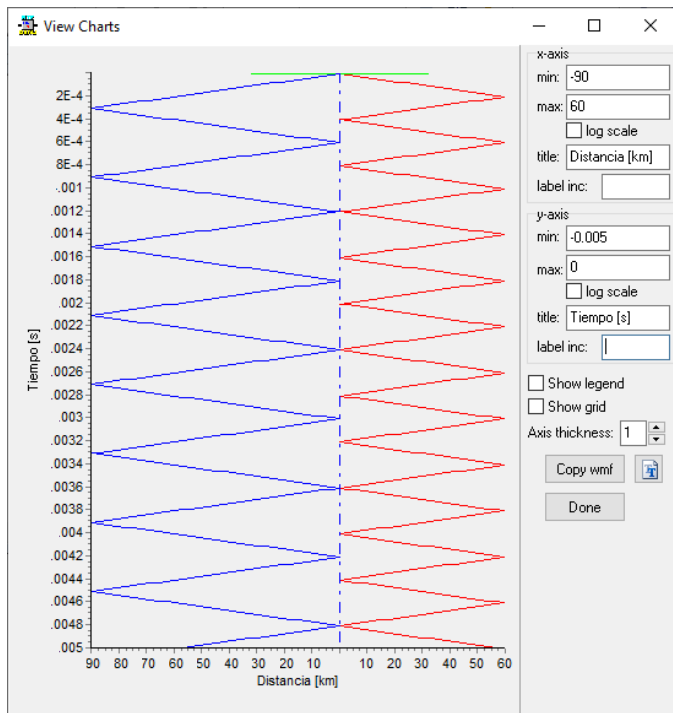


Fig. 9. Graficador de distancia con el diagrama Lattice de Bewley en ATP/EMTPTM.

V. CASOS DE ESTUDIO

Para demostrar el funcionamiento del graficador de onda viajera se realiza una simulación en ATP/EMTPTM y se considera una línea de transmisión radial de 180 km conectada a una fuente ideal de 400 kV y con una velocidad de propagación igual a la velocidad de la luz $c=300000$ km/s y una impedancia característica de $Z_C = 300 \Omega$. Es importante mencionar que como la velocidad de propagación de las ondas es muy rápida, la fuente de 60 Hz no tiene una influencia considerable en el comportamiento de las ondas viajeras en la línea de transmisión. El objetivo es analizar el concepto de onda viajera usando 6 tramos de línea de 30 km, considerando diferentes valores de distancia de la perturbación ($d=30$ km, $d=90$ km y $d=120$ km). Además, se pretende mostrar el comportamiento de la onda con diferentes coeficientes de reflexión.

A. Perturbación a 30 km de la Línea

El circuito de la Fig. 10 ilustra una línea larga de parámetros distribuidos, además se muestra una fuente de DC representando una perturbación a 30 km del inicio de la línea. Las impedancias conectadas en ambos extremos de la línea son muy grandes por lo que se concluye que los coeficientes de reflexión en ambas terminales son cercanos a 1.

Se representa en la Fig. 11 que la propagación de la onda en el extremo más cercano de la perturbación es más rápida debido a que la distancia es más corta, por el contrario, en el otro extremo la onda tiene un camino más largo que recorrer por lo tanto, las reflexiones toman un tiempo más grande en producirse. El propósito es observar la propagación de las ondas viajeras a través de la línea de transmisión.

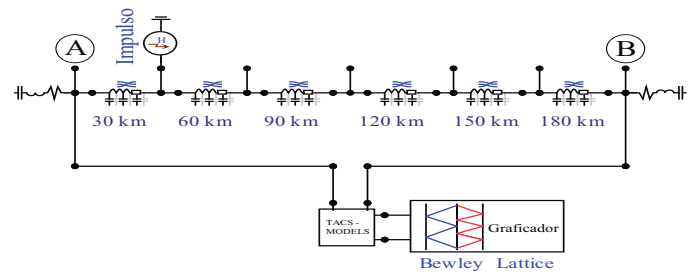


Fig. 10. Línea larga de parámetros distribuidos en ATPTM a la que se aplica una perturbación representada por un impulso a 30 km.

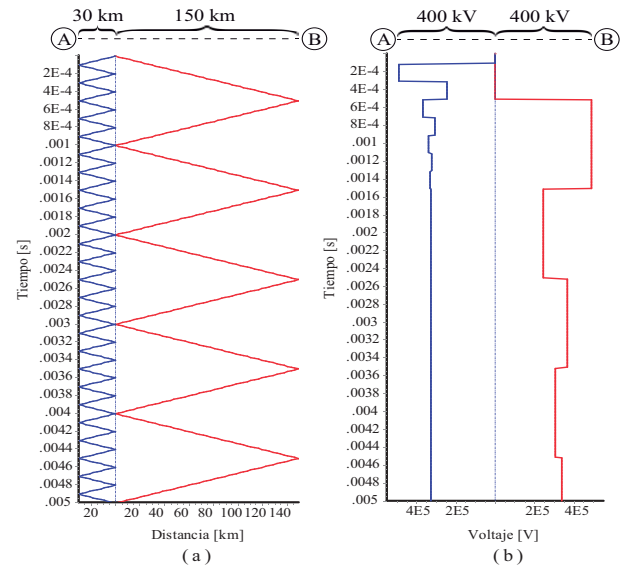


Fig. 11. Diagrama Lattice de Bewley con una perturbación a 30 km. (a) Representación de las ondas viajeras con respecto al tiempo y la distancia; (b) representación de las ondas viajeras con respecto a la magnitud de voltaje.

Se muestra en la Fig. 11(a) las reflexiones de voltaje causadas por una perturbación organizadas en el diagrama Lattice de Bewley, se observa que en el eje horizontal se señala la distancia que viajan las ondas, las cuales coinciden con la distancia a cada extremo de la línea. Mientras que en la Fig 11(b), el eje de las abscisas representa la magnitud de voltaje de las ondas.

B. Perturbación a 90 km de la Línea

En el circuito de la Fig. 12 se muestra una línea larga de 180 km con una fuente de DC con voltaje pico de fase igual a 400 kV simulando una perturbación en la mitad de la línea.

En la Fig. 13(a) se observa que debido a que el índice de reflexión tiene valor de cercano a la unidad, mientras que el voltaje se refleja completamente tanto del lado de la fuente como de la carga, evidenciando que las reflexiones son a 90 km de cada lado. La Fig. 13(b) muestra la magnitud de las ondas reflejadas en cada extremo de la línea. Es importante mencionar que las impedancias conectadas en ambos extremos de la línea son muy grandes, es decir $Z_R \gg Z_C$ y $Z_S \gg Z_C$ los coeficientes de reflexión en ambas terminales son $\Gamma_S = 1$ y $\Gamma_R = 1$.

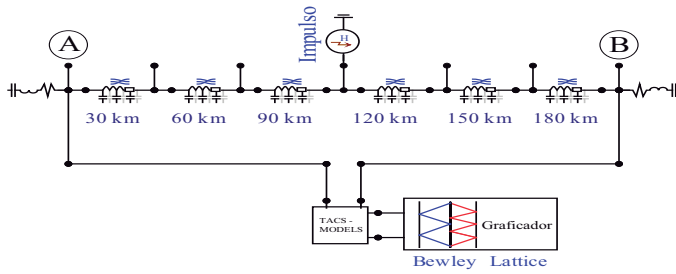


Fig. 12. Línea larga de parámetros distribuidos en ATPTM a la que se aplica una perturbación representada por un impulso a 90 km.

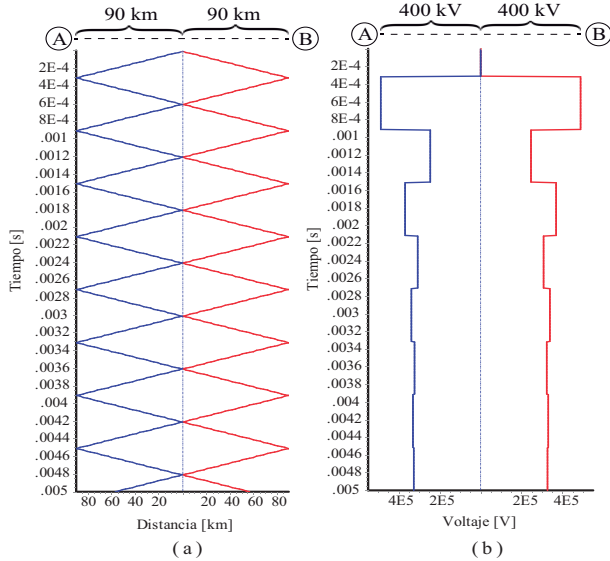


Fig. 13. Diagrama Lattice de Bewley con una perturbación a 90 km. (a) Representación de las ondas viajeras con respecto al tiempo y la distancia; (b) representación de las ondas viajeras con respecto a la magnitud de voltaje.

C. Perturbación a 120 km de la Línea

En el siguiente caso se analiza la misma línea larga de parámetros distribuidos, pero en este caso se utiliza una fuente de DC con voltaje pico de fase igual a 400 kV simulando una perturbación a 120 km del inicio de la línea. El diagrama del caso utilizado se muestra en la Fig. 14.

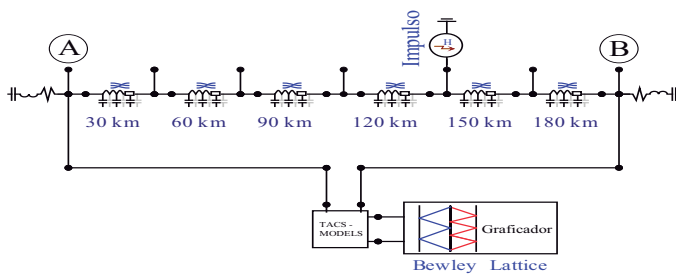


Fig. 14. Línea larga de parámetros distribuidos en ATPTM a la que se aplica una perturbación representada por un impulso a 120 km.

Se observa en la Fig. 15 que las reflexiones en los últimos dos tramos de la línea son más rápidos que en los primeros cuatro debido a que la distancia que recorren es más corta. En el caso

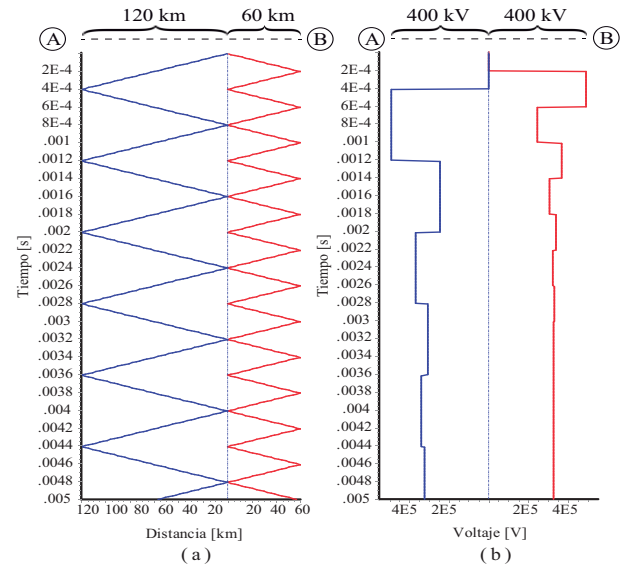


Fig. 15. Diagrama Lattice de Bewley con una perturbación a 120 km. (a) Representación de las ondas viajeras con respecto al tiempo y la distancia; (b) representación de las ondas viajeras con respecto a la magnitud de voltaje.

contrario cuando una distancia más grande se recorre el tiempo de propagación de la onda es más corto. Como en los dos casos anteriores los coeficientes de reflexión en ambas terminales son iguales a uno por lo que toda la onda es reflejada completamente.

El diagrama Lattice de Bewley que organiza las reflexiones de voltaje se muestra en la Fig. 15(a) y en la Fig. 15(b) se observa la magnitud de voltaje de las ondas viajeras. Las figuras del diagrama de Lattice muestran que el algoritmo implementado calcula la distancia desde la perturbación a cada una de las terminales, esto se percibe en el eje de las abscisas donde el primer y el último valor son la distancia de la perturbación a cada una de las terminales.

El propósito es observar la propagación de las ondas viajeras a través de la línea de transmisión.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se destaca la creación una herramienta de visualización de ondas viajeras de voltaje y corriente implementada en *Transient Analysis Control System (TACS)* y *MODELS* del software *ATP/EMTPTM* para propósitos educativos en la cual se simularon perturbaciones sobre una línea de transmisión larga compuesta por varias secciones de parámetros distribuidos. Es importante destacar también que en este artículo se determinan matemáticamente los coeficientes de reflexión de una línea de transmisión de parámetros distribuidos, considerando la solución Laplaciana para el modelo universal de línea. Actualmente, la identificación de perturbaciones en sistemas eléctricos como son fallas, sobrevoltajes por maniobra o descargas atmosféricas pueden ser detectados por los transitorios electromagnéticos como son, la propagación de ondas generadas por un disturbio en el sistema, lo cual permite la implementación de nuevos esquemas de protección que utilizan las ondas viajeras para determinar si existe una falla y su ubicación en la línea de

transmisión.

Aunque en la literatura se han presentado diversos algoritmos que hacen uso de la identificación de ondas viajeras para la localización de fallas, el uso del diagrama Lattice de Bewley ha sido poco utilizado para representar este tipo de fenómenos de una manera práctica. La propuesta del artículo se centra en el desarrollo de una herramienta para la visualización de la transición temporal de ondas de voltaje y corriente durante su propagación y en este trabajo se mostró una metodología para su representación mediante el diagrama Lattice de Bewley. Finalmente, la plataforma realizada en *ATP/EMTP*TM permite observar de forma automática la distancia de la falla a cada uno de los extremos de la línea.

REFERENCIAS

- [1] L. V. Bewley, *Traveling Waves on Transmission Systems*, in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 50, no. 2, pp. 532-550, June 1931.
- [2] EMTP Users Group, *ATP Rule Book*. 1997.
- [3] J. Duncan Glover and Mulukutla S. Sarma. 2001. *Power System Analysis and Design* (3rd ed.). Brooks/Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA, USA.
- [4] X. Dong, S. Wang and S. Shi, *Research on characteristics of voltage fault traveling waves of transmission line*, 2010 Modern Electric Power Systems, Wroclaw, 2010, pp. 1-5.
- [5] F. B. Costa, A. Monti, F. V. Lopes, K. M. Silva, P. Jamborsalamati and A. Sadu, *Two-Terminal Traveling-Wave-Based Transmission-Line Protection*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 32, no. 3, pp. 1382-1393, June 2017.
- [6] F. V. Lopes, K. M. Dantas, K. M. Silva and F. B. Costa, *Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 873-880, April 2018.
- [7] E. J. S. Leite, F. V. Lopes and J. P. G. Ribeiro, *Traveling Wave-Based Fault Location on Two-Segment Hybrid Lines*, 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, OR, 2018, pp. 1-5.
- [8] L. de Andrade and M. Teresa Ponce de Leao, *Fault Location for Transmission Lines Using Wavelet*, in IEEE Latin America Transactions, vol. 12, no. 6, pp. 1043-1048, Sept. 2014.
- [9] F. Vigolvinho Lopes, B. Fernandes Kusel and K. Melo Silva, *Traveling Wave-Based Fault Location on Half-Wavelength Transmission Lines*, in IEEE Latin America Transactions, vol. 14, no. 1, pp. 248-253, Jan. 2016.
- [10] F. V. Lopes and E. J. S. Leite, *Traveling Wave-Based Solutions for Transmission Line Two-Terminal Data Time Synchronization*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 6, pp. 3240-3241, Dec. 2018.
- [11] B. Datta and S. Chatterjee, *A literature review on use of Bewley's lattice diagram*, 2012 1st International Conference on Power and Energy in NERIST (ICPEN), Nirjuli, 2012, pp. 1-4.
- [12] C. Y. Evrenosoglu, A. Abur, E. Akleman and O. O. Ozener, *Bewley Diagrams Revisited via Visualization*, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 3, pp. 1401-1407, Aug. 2009.
- [13] Juan Manuel Miguel Jiménez, Javier Calpe Maravilla, *Simulador de Transitorios en líneas de transmisión: Una propuesta original de análisis*, in IEEE Latin America Transactions, vol. 2, no. 3, Sep. 2004.
- [14] B. Datta and S. Chatterjee, *Simulation of Bewley's lattice diagram using MATLAB*, 2013 IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), Kolkata, 2013, pp. 11-16.
- [15] Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2008). "Power system analysis and design". Australia: Thomson.
- [16] Anderson, P. M. (1999). "Power System Protection". New York: McGraw-Hill.
- [17] Greenwood, A. (1971). "Electrical Transient in Power Systems". New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [18] V. Torres, J. L. Guardado, H. F. Ruiz, and S. Maximov, *Modeling and Detection of High Impedance Fault*, International Journal Electric and Power Energy, Vol.61. pp. 163-172.
- [19] Abdelsalam Mohamed Elhaffar, 2008, *Power Transmission Line Fault Location Based On Current Traveling Waves*, (Tesis Doctoral), Helsinki University of Technology, Helsinki, Finlandia.
- [20] Grainger, John J., and William D. Stevenson. "Power System Analysis", New York: McGraw-Hill, 1994.



Victor H. Gonzalez (M' 19) nació en México, recibió el grado de Ingeniero en Eléctrica Electrónica de la Universidad Nacional Autónoma de México en el 2018. Actualmente, se desempeña como estudiante del programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica - Sistemas Eléctricos de Potencia, sus áreas de interés son transitorios electromagnéticos, protecciones eléctricas y sistemas eléctricos de potencia.



Romel A. Cardenas (M' 18) nació en Perú y obtuvo el título de ingeniero electricista en la Universidad Nacional del Centro de Perú en el 2014. Actualmente, se desempeña como estudiante del programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica - Sistemas Eléctricos de Potencia, sus áreas de interés son operación y control de sistemas eléctricos, protecciones eléctricas y transitorios electromagnéticos.



Vicente Torres (M' 08 - SM' 18) nació en México, obtuvo el grado de Ingeniero, Maestro y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia en el 2008, 2009 y 2014, respectivamente. Actualmente, se desempeña como Profesor Asociado en el Departamento de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional Autónoma de México, sus áreas de interés son sistemas eléctricos de potencia y distribución, transitorios electromagnéticos y protecciones eléctricas.



Mario R. Arrieta Paternina (M' 11) nació en Colombia, obtuvo su grado de Ingeniero y Maestro en Ingeniería en la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) en 2007 y 2009, respectivamente. Recibió el grado de Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV, en 2017. Actualmente, se desempeña como Profesor Asociado en el Departamento de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Entre sus áreas de interés se encuentran la operación y control de los sistemas eléctricos de potencia.