

PROPAGACION DE SOBRETENSIONES EN LINEAS CON PARAMETROS DISTRIBUIDOS

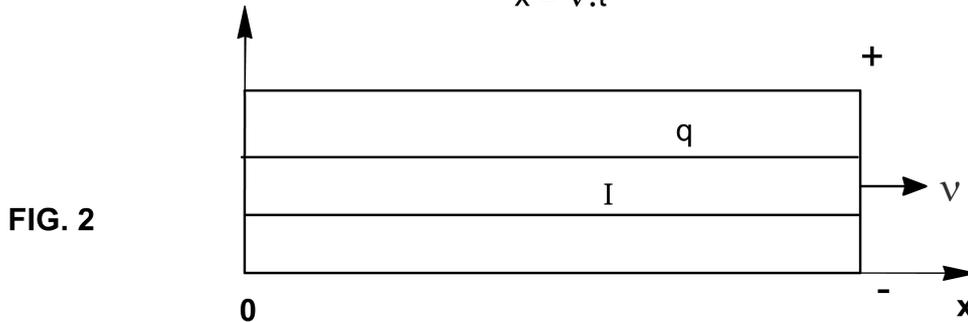
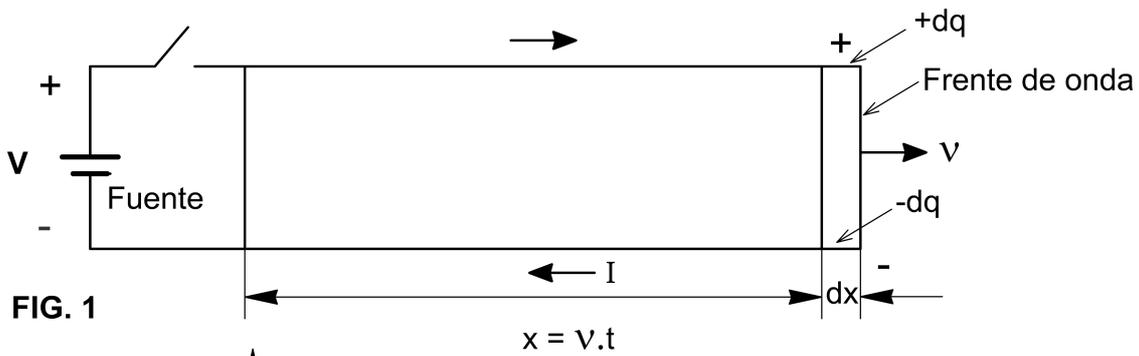
En las líneas de transporte de energía, pueden aparecer bruscas sobretensiones debidas a causas externas (Atmosféricas) o causas internas (maniobras, fallas y otros fenómenos). Estas sobretensiones se propagarán a lo largo de las líneas y podrán reflejarse en los puntos de cambio de impedancia.

A continuación estudiaremos, a través de modelos simplificados, como se producen y propagan las sobretensiones en líneas.

ONDAS DE FRENTE RECTANGULAR

Sea una línea sin pérdidas, con una inductancia L por unidad de longitud y una capacidad C por unidad de longitud, que se conecta en el instante $t = 0$ a una fuente de tensión V , de resistencia interna nula, como muestra la **FIG. 1**.

La línea se carga hasta alcanzar el potencial V , el que se propaga en la línea formando una onda de frente rectangular como detallamos a continuación:



La línea se irá cargando progresivamente, como muestra la figura, de modo que el elemento dx que tiene capacidad $c \cdot dx$ se carga con $dq = c \cdot V \cdot dx$ en el tiempo dt , lo que origina una corriente que va desde la fuente hasta el elemento dx en el frente de onda, como se ve en la **FIG. 2**. La corriente tiene un valor I

$$I = \frac{dq}{dt} = c \cdot V \cdot \frac{dx}{dt} = c \cdot V \cdot v \quad (1)$$

Donde $\frac{dx}{dt} = v$ Es la velocidad con que se propaga el frente de onda.

La corriente que está formada por un verdadero movimiento de cargas entre los puntos 0 y x, se cierra en el frente por la corriente de desplazamiento en el capacitor infinitesimal formado por los elementos de conductor dx .

Si se analiza ahora este frente de onda delante de él, la tensión en la línea es nula y detrás de él tiene el valor V. Este descenso brusco de la tensión en el frente se puede explicar considerando a todo el conjunto como una espira que se extiende a la velocidad v .

Por su parte la fuerza electromotriz inducida en la mencionada espira; como consecuencia de la variación de flujo Φ será:

$$-\frac{d\phi}{dt} = -L \cdot I \cdot \frac{dx}{dt} = -L \cdot I \cdot v = -V \quad (2)$$

Se cumple así en la espira la segunda ley de Kirchoff ya que $V + (-V) = 0$

De la expresión de la corriente (1) y de la tensión (2) se pueden obtener las siguientes expresiones:

$$v = \frac{I}{C \cdot V} \quad v = \frac{V}{L \cdot I} \quad \text{igualando ambas expresiones resulta:}$$

$$v^2 = \frac{1}{L \cdot C} \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3) \quad \text{Conocida expresión de la velocidad de propagación}$$

También a partir de las expresiones (1) y (2) podemos escribir:

$$\left. \begin{array}{l} V = L \cdot v \cdot I \\ I = C \cdot v \cdot V \end{array} \right\} \text{Dividiendo m a m ambas expresiones y operando resulta:}$$

$$\frac{V}{I} = \frac{L \cdot I}{C \cdot V} \Rightarrow \frac{V^2}{I^2} = \frac{L}{C} \Rightarrow \frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 \quad (4)$$

La expresión (4) es la impedancia característica de una línea sin pérdidas, y por ser la relación entre la tensión y la corriente de una onda de sobre tensión la llamaremos impedancia de sobretensión.

Haremos ahora algunas consideraciones energéticas:

- Dado que la corriente fluye en forma constante desde la fuente (Mientras dure el proceso de carga de la línea), la energía entregada por la fuente por unidad de tiempo es:

$$V \cdot I = \frac{V^2}{Z_0} \quad \text{ya que } \frac{V}{I} = Z_0 \Rightarrow I = \frac{V}{Z_0} \therefore V \cdot I = V \cdot \frac{V}{Z_0} = \frac{V^2}{Z_0}$$

- En cada unidad de longitud de línea se acumulan las siguientes energías en forma de campo eléctrico y magnético:

$$\frac{C \cdot V^2}{2} \left[\frac{\text{joule}}{\text{m}} \right] \quad \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Siendo v la velocidad de propagación de la onda, podemos escribir la siguiente igualdad:

$$V \cdot I = v \cdot \left(\frac{C \cdot V^2}{2} + \frac{L \cdot I^2}{2} \right) \left[\text{watt} = \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{joule}}{\text{m}} \right] \quad (5)$$

Pero, $I = C \cdot V \cdot v$

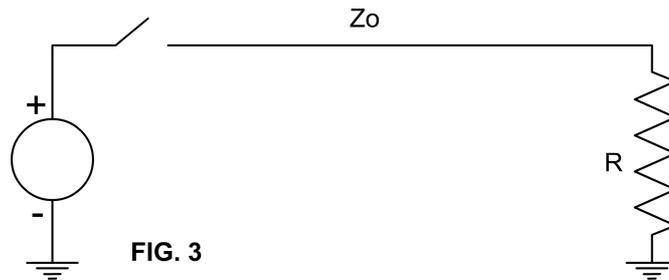
Reemplazando I en la expresión (5) y eliminando v de ambos miembros se obtiene:

$$C \cdot V^2 = \frac{C \cdot V^2}{2} + \frac{L \cdot I^2}{2} \text{ operando resulta } \frac{L \cdot I^2}{2} = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad (6)$$

La (6) indica que la energía acumulada en el campo magnético por unidad de longitud de línea es igual a la energía acumulada en el campo eléctrico.

A partir de las consideraciones realizadas, analizaremos a continuación el comportamiento de una línea de impedancia Z_0 por la cual viaja una onda de frente rectangular

Reflexión en una terminación resistiva



Al incidir una onda rectangular V^+ en la terminación, aparecerá una tensión V_R sobre la resistencia, y se reflejará una onda de amplitud V^- .

La potencia de la onda incidente vale: $\frac{(V^+)^2}{Z_0}$

La potencia disipada en la resistencia vale: $\frac{V_R^2}{R}$

La potencia de la onda reflejada será: $\frac{(V^-)^2}{Z_0}$

Por el principio de conservación de la energía se puede escribir la siguiente expresión:

$$\frac{(V^+)^2}{Z_0} = \frac{(V_R)^2}{R} + \frac{(V^-)^2}{Z_0} \quad (7)$$

Multiplicando a m a m la (7) por Z_0 y operando resultan las siguientes expresiones:

$$(V^+)^2 = V_R^2 \cdot \frac{Z_0}{R} + (V^-)^2 \text{ la que puede escribirse } (V^+)^2 - (V^-)^2 = \frac{V_R^2 \cdot Z_0}{R}$$

$$\text{O también } [(V^+) + (V^-)] \cdot [(V^+) - (V^-)] = \frac{V_R^2 \cdot Z_0}{R}$$

Pero por otra parte $(V^+) + (V^-) = V_R$ y reemplazando en la anterior resulta:

$$\frac{V_R^2 \cdot Z_0}{R} = V_R \cdot [(V^+) - (V^-)] \quad \text{dividiendo m a m por } V_R \text{ resulta:}$$

$$\frac{V_R \cdot Z_0}{R} = [(V^+) - (V^-)] \quad (8) \quad \text{y como } V_R = [(V^+) + (V^-)] \quad (9)$$

Sumando m a m la (8) y la (9) obtendremos:

$$2 \cdot (V^+) = V_R \cdot \left(1 + \frac{Z_0}{R}\right) \text{ de donde se obtiene } V_R = \frac{2 \cdot (V^+)}{1 + \frac{Z_0}{R}} \quad (10)$$

$$\text{Pero como } V^+ + V^- = V_R \quad (11)$$

Igualando con la (10) y despejando V^- , resulta:

$$V^- = \frac{2V^+}{1 + \frac{Z_0}{R}} - V^+ = \frac{2V^+ - \left(1 + \frac{Z_0}{R}\right) \cdot V^+}{1 + \frac{Z_0}{R}} = \frac{2V^+ - \left(\frac{R + Z_0}{R}\right) \cdot V^+}{\frac{R + Z_0}{R}} = \frac{V^+(2R - R - Z_0)}{R + Z_0} =$$

$$V^- = V^+ \frac{(R - Z_0)}{(R + Z_0)} = V^+ \cdot \rho_R \quad (12) \text{ siendo } \rho_R \text{ el coeficiente de reflexión del}$$

receptor. En igual forma podríamos establecer el coeficiente de reflexión del extremo transmisor.

$$\rho_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \quad (13) \text{ donde } Z_S \text{ es la impedancia del extremo transmisor}$$

Por su parte la corriente en la resistencia será:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{2V^+}{R + Z_0} \quad (14) \text{ y teniendo en cuenta la primera ley de Kirchoff:}$$

$$I_R = I^+ + I^- \text{ Despejando } I^- \text{ resulta:}$$

$$I^- = I_R - I^+ = \frac{2V^+}{R + Z_0} - \frac{V^+}{Z_0} = \frac{2V^+Z_0 - V^+R - V^+Z_0}{(R + Z_0)Z_0} = \frac{V^+(Z_0 - R)}{Z_0(Z_0 + R)} = -\frac{V^+(R - Z_0)}{Z_0(R + Z_0)}$$

$$I^- = -I^+ \cdot \rho_R \quad (15)$$

Veamos a continuación algunos casos típicos:

a) Línea terminada en corto circuito $R = 0$

De las expresiones (11) y (14)

$$V_R = 0 \Rightarrow V^- = -V^+ \text{ también } I_R = \frac{2V^+}{Z_0} = 2 \cdot I^+ \Rightarrow I^- = 2 \cdot I^+ - I^+ = I^+$$

En consecuencia, en una línea con su extremo en cortocircuito, la onda de tensión se reflejará invertida, en cambio la onda de corriente se refleja sin inversión.

Desde el punto de vista energético la reflexión es total, Ya que siendo

$$V^+ = -V^- \text{ resulta: } \frac{(V^+)^2}{Z_0} = \frac{(V^-)^2}{Z_0}$$

La FIG. 4 ilustra el proceso de reflexión en una terminación de resistencia nula, siguiendo el proceso antes, durante y después de la llegada de la onda al extremo receptor.

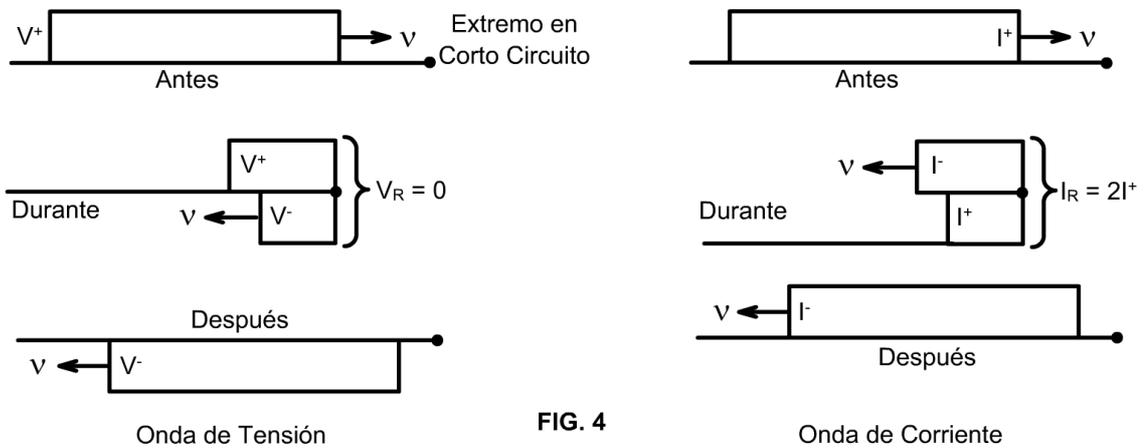


FIG. 4

Reflexión de una línea con el extremo en cortocircuito

Se trata de un caso de reflexión total.

b) Línea terminada en circuito abierto ($R = \infty$)

De las ecuaciones (10) y (14) resulta:

$$V_R = 2V^+ \quad I_R = 0$$

Y también $V^- = V_R - V^+ = 2V^+ - V^+ = V^+$

$$I_R = I^+ + I^- \Rightarrow I^- = I^+$$

Desde el punto de vista energético se cumple:

$$\frac{(V^+)^2}{Z_0} = \frac{(V^-)^2}{Z_0} \quad \text{Este también es un caso de reflexión total}$$

La FIG. 5 ilustra este caso.

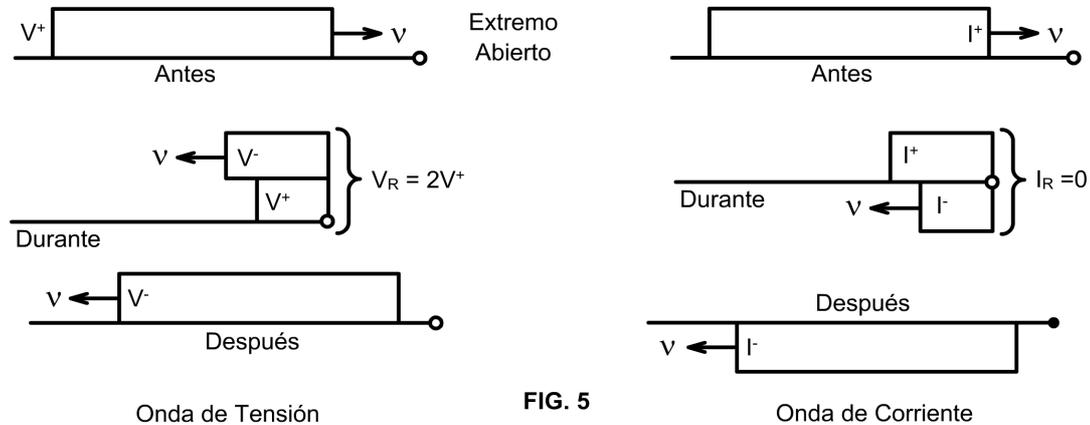


FIG. 5

Reflexión de una línea con el extremo abierto

c) Línea terminada en una impedancia igual a la característica ($R = Z_0$)

De las ecuaciones (10) y (14) resulta:

$$V_R = \frac{2V^+}{1 + \frac{Z_0}{R}} = \frac{2V^+}{2} = V^+ \Rightarrow V^- = V_R - V^+ = 0$$

Con las corrientes resulta:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{V^+}{Z_0} = I^+ \Rightarrow I^- = I_R - I^+ = 0$$

Desde el punto de vista energético la potencia incidente $\frac{(V^+)^2}{Z_0}$ se

consume totalmente en la carga ya que: $\frac{(V_R)^2}{R} = \frac{(V^+)^2}{Z_0}$

d) Analizaremos ahora dos casos de reflexión parcial.

d1) La resistencia de carga es mayor que la impedancia característica ($R > Z_0$)

De la expresión (10) podemos escribir:

$(1 + \frac{Z_0}{R}) \cdot V_R = 2V^+$ y teniendo en cuenta la condición de que $R > Z_0$, para que se cumpla la igualdad debe ser

$V_R > V^+$ y por lo tanto $V^- = V_R - V^+ > 0$

En igual forma podemos analizar las corrientes a partir de la expresión (14)

$(R + Z_0) \cdot I_R = 2V^+ = 2 \cdot I^+ Z_0$ dividiendo m a m por Z_0 resulta :

$$(1 + \frac{R}{Z_0}) \cdot I_R = 2 \cdot I^+ \therefore I^+ > I_R \Rightarrow I^- = I_R - I^+ < 0$$

La FIG. 6 ilustra este caso de reflexión parcial

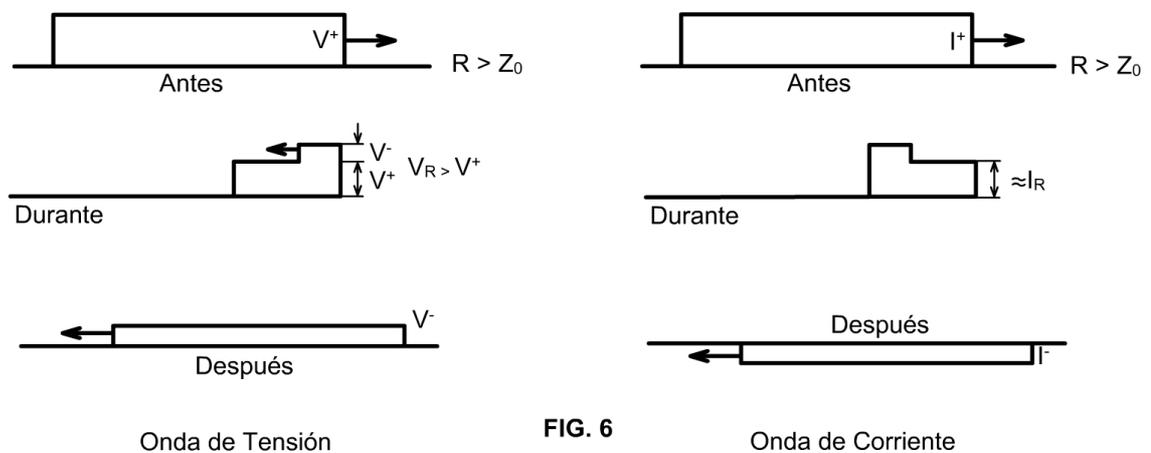


FIG. 6

Reflexión en una línea con una resistencia $R > Z_0$ en su extremo

d2) La resistencia de carga es menor que la impedancia característica ($R < Z_0$) o sea $\frac{Z_0}{R} > 1$

En este caso se tiene: $(1 + \frac{Z_0}{R}) \cdot V_R = 2V^+ \therefore V_R < V^+ \therefore V^- < 0$

Por otra parte $(1 + \frac{R}{Z_0}) \cdot I_R = 2 \cdot I^+ \therefore I^+ < I_R \therefore I^- > 0$

La FIG. 7 ilustra esta reflexión parcial

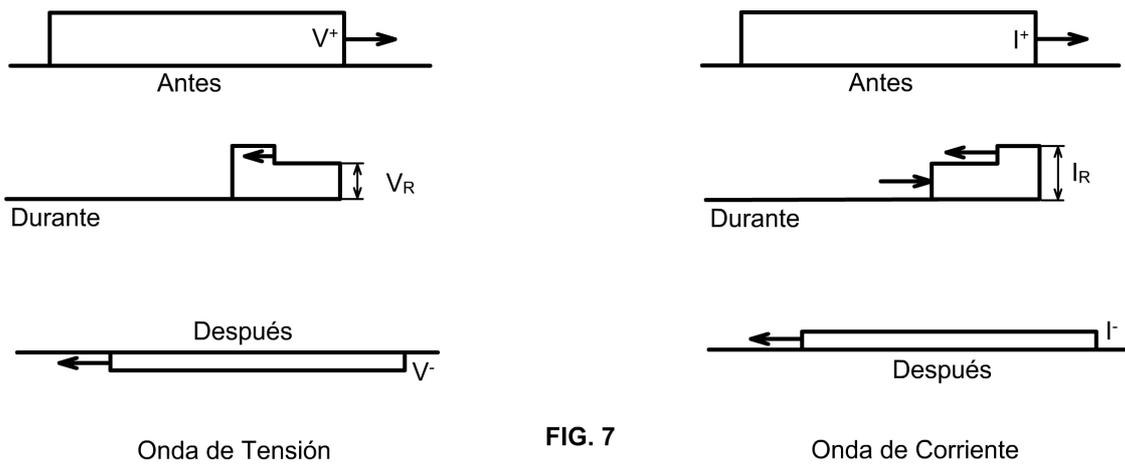


FIG. 7

Veamos ahora un par de ejemplos reales de reflexión parcial, como son la discontinuidad de línea a cable o la bifurcación de una línea en otras dos.

Discontinuidad línea cable

La FIG. 8 muestra una línea aérea de impedancia Z_{01} que continúa en un cable subterráneo de impedancia Z_{02}

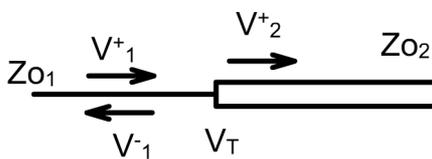


FIG. 8

La tensión en la unión de la línea con el cable (V_T) será: $V_T = V_1^+ + V_1^-$
 Esta tensión es igual a la de la onda incidente que continúa por el cable V_2^+ . Aquí debemos recordar que la impedancia característica del cable supuesto sin pérdidas, equivale a una resistencia en el extremo de la línea en lo que a la reflexión se refiere.

La energía $\frac{(V_T)^2}{Z_{02}}$ en lugar de disiparse en la unión, continúa propagándose por el cable, por lo que a partir de la expresión (10) podemos escribir:

$$V_T = V_1^+ + V_1^- = \frac{2Z_{02} \cdot V_1^+}{Z_{02} + Z_{01}} = V_2^+ = K_{1T} \cdot V_1^+$$

Donde $K_{1T} = \frac{2Z_{02}}{Z_{02} + Z_{01}}$ es el llamado coeficiente de transmisión de tensión o coeficiente de refracción, ya que es el valor por el cual hay que multiplicar a la tensión incidente en la unión línea cable, para obtener la tensión incidente sobre el cable.

Teniendo en cuenta que la impedancia característica de un cable es inferior a la de una línea es decir $Z_{02} < Z_{01}$; observando la expresión del coeficiente de refracción vemos que $K_{1T} < 1$ por lo tanto $V_2^+ < V_1^+$. Esta desigualdad nos muestra que la tensión incidente en el cable y que continuará viajando por éste, es menor que la tensión incidente en la línea. Esto puede interpretarse como que la discontinuidad línea cable actúa como atenuador de las sobretensiones. En las líneas de distribución en 13,2 Kv que abastecen poblaciones urbanas, la acometida al transformador reductor se hace intercalando un cable entre la línea y el transformador a fin de atenuar las posibles sobretensiones de origen atmosférico. En la práctica esta medida se complementa con un descargador de sobretensiones instalado muy próximo al transformador.

Bifurcación de una línea

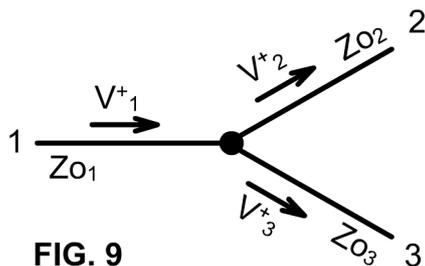


FIG. 9

La figura (9) muestra una línea de impedancia Z_{01} que se bifurca en dos líneas de impedancias Z_{02} y Z_{03} respectivamente. La onda incidente V_1^+ se encuentra en la bifurcación con una impedancia Z_p siendo esta:

$Z_p = \frac{Z_{02}Z_{03}}{Z_{02} + Z_{03}}$ La tensión en el punto de unión (Considerando la expresión

$$(10) \text{ será: } V_T = \frac{2V_1^+ \cdot Z_p}{Z_p + Z_{01}} = V_2^+ = V_3^+$$

Este será el valor de la tensión de las ondas que continuarán a lo largo de las líneas 2 y 3

Las corrientes en las líneas 2 y 3 valdrán: $I_2^+ = \frac{V_2^+}{Z_{02}} = \frac{V_T}{Z_{02}}$, también

$$I_3^+ = \frac{V_3^+}{Z_{03}} = \frac{V_T}{Z_{03}}$$

La tensión reflejada en la línea 1 será: $V_1^- = \frac{Z_p - Z_{01}}{Z_p + Z_{01}} \cdot V_1^+$

Los casos estudiados nos permiten analizar casos reales mas complejos siguiendo los principios básicos de reflexión y refracción expuestos.