

# **CAPITULO 1.**

## **ANÁLISIS DE CIRCUITOS EN ESTADO ESTABLE EN FORMA ANALÓGICA.**

### **INTRODUCCIÓN.**

Un circuito eléctrico se puede describir con base a los elementos que contiene y como se interconectan a las fuentes de voltaje o corriente. Los elementos de un circuito se componen de resistencias, inductancias y capacitancias. Para determinar los voltajes y corrientes a lo largo de toda la red, existen diversos métodos de análisis, tales como análisis de mallas, análisis de nodos, equivalentes de Thevenin y Norton, división de voltaje o corriente, superposición, reciprocidad, transferencia máxima de potencia, etc.

Los circuitos se subdividen en monofásicos y trifásicos, siendo el más utilizado este último debido a razones de economía y eficiencia, y por esta razón, casi toda la energía eléctrica es producida por fuentes trifásicas a 50 o 60 Hz. , siendo esta última la frecuencia convencional en nuestro País.

Iniciaremos la presente tesis describiendo los sistemas monofásicos, pero nos concentraremos en los circuitos trifásicos que es lo más común en los sistemas eléctricos de potencia y en forma balanceada para la utilización del paquete Pspice, dejando la forma desbalanceada de un sistema de potencia al calculo de fallas.

## 1.1. - ANÁLISIS DE MALLAS Y NODOS.

Para el análisis de una red por medio de mallas, esta en base a la primera Ley de Kirchhoff [1], [2], [3], la cual dice que la suma de los voltajes a través de una malla o lazo cerrado debe de ser igual a cero, o en otras palabras, la suma de las subidas de voltajes debe de ser igual a la suma de las caídas de voltaje. Por el ejemplo en el circuito de la Fig. 1.1, observamos una fuente de voltaje en serie con dos impedancias, y tomando en cuenta que la corriente es la misma a lo largo del circuito tenemos:

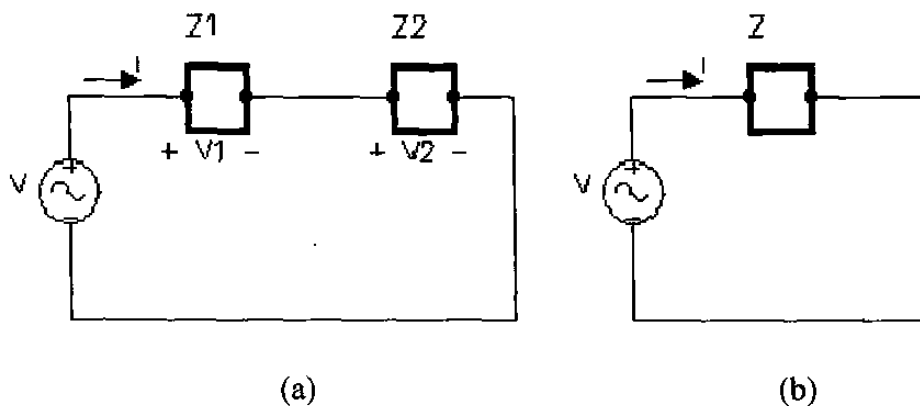


Fig. 1.1.- (a) Circuito serie con dos impedancias; (b) Circuito equivalente.

$$V - V_1 - V_2 = 0 \Rightarrow V = V_1 + V_2$$

por la Ley de Ohm sabemos que:  $V = IZ$ , sustituyendo esta ecuación en la anterior tenemos:

$$V = IZ_1 + IZ_2 \Rightarrow V = I(Z_1 + Z_2)$$

con lo que podemos calcular la corriente que circula en el circuito, despejando, por lo tanto

$$I = V/Z \quad (1.1)$$

$$\therefore Z = Z_1 + Z_2$$

como la impedancia puede estar compuesta por resistencias, inductancias y capacitancias [1], [2], [3], podemos suponer que:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L \quad \& \quad Z_2 = R_2 + 1/j\omega C$$

$$\therefore Z = (R_1 + j\omega L) + (R_2 + 1/j\omega C) \Rightarrow Z = (R_1 + R_2) + j(\omega L - 1/\omega C)$$

Si hacemos que:  $R = (R_1 + R_2)$  &  $X = (\omega L - 1/\omega C)$ , tendremos:

$$Z = R + jX$$

con lo que resulta que la impedancia es un número complejo, o sea que tiene una magnitud  $|Z|$  y un ángulo  $\theta$ , (ver apéndice A.1), en la cual:

$$Z = |Z| \angle \theta$$

Sustituyendo en la Ec. 1 tenemos

$$I = V \angle(\alpha \pm \theta) / Z \quad (1.2)$$

siendo  $\alpha$  el ángulo de defasamiento del voltaje.

Para el análisis de nodos de una red, esta en base a la segunda ley de Kirchhoff [1], [2], [3], la cual dice que la suma de las corrientes que convergen en un nodo debe de ser igual a cero, o en otras palabras, las corrientes que entran al nodo debe de ser igual a las corrientes que salen de dicho nodo. Consideremos el circuito de la Fig. 1.2, el cual

consiste de una fuente de corriente en paralelo con dos impedancias, y tomando en cuenta que el voltaje es el mismo en un circuito en paralelo tenemos:

$$I - I_1 - I_2 = 0 \Rightarrow I = I_1 + I_2$$

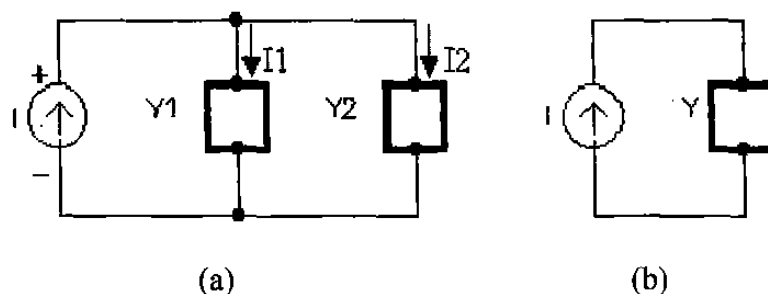


Fig. 1.2.- (a) Circuito paralelo con dos impedancias; (b) Circuito equivalente.

por la Ley de Ohm sabemos que  $I = V/Z$ , sustituyendo esta ecuación en la anterior, tenemos:

$$I = V/Z_1 + V/Z_2 \Rightarrow I = V ( 1/Z_1 + 1/Z_2 )$$

si llamamos  $Y$  al termino  $1/Z$  (conocido como admitancia), simplificamos la ecuación anterior a la forma:

$$I = V( Y_1 + Y_2 )$$

con lo que podemos calcular el voltaje del circuito [1], [2], [3], por lo tanto:

$$\begin{aligned} V &= I/Y \quad \therefore Y = Y_1 + Y_2 \\ V &= IZ \end{aligned} \tag{1.3}$$

al igual que el análisis anterior,  $Z$  es un número complejo, y sustituyendo lo anteriormente descrito tenemos:

$$V = |Z| |I| \angle ( \beta \pm \theta ) \tag{1.4}$$

siendo  $\beta$  el ángulo de defasamiento de la corriente.

## 1.2. - ANÁLISIS DE CIRCUITOS TRIFÁSICOS.

Los sistemas de potencia se suministran por generadores trifásicos, que suministran potencia a las cargas trifásicas las cuales pueden estar balanceadas o desbalanceadas, para el análisis consideraremos el sistema trifásico balanceado, esto es, que las cargas tienen impedancias idénticas en las tres fases, aunque se sigue la misma secuencia para el cálculo en los sistemas desbalanceados.

Consideremos el circuito de la Fig. 1.3, donde se muestra un generador conectado en  $Y$ , el punto marcado con una  $n$ , representa el neutro del generador. Los voltajes  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ , y  $V_{cn}$  entre las terminales de la terminal neutra se conocen como voltaje de fase [1], [2], [3], y están dadas por:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_p \angle 0^\circ \\ V_{bn} &= V_p \angle -120^\circ \\ V_{cn} &= V_p \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (1.5)$$

o también por:

$$\begin{aligned} V_{an} &= V_p \angle 0^\circ \\ V_{bn} &= V_p \angle 120^\circ \\ V_{cn} &= V_p \angle -120^\circ \end{aligned} \quad (1.6)$$

conocidas como secuencias abc o positiva y secuencia cba o negativa, respectivamente [1], [2], [3]. En ambos casos, cada voltaje de fase tiene la misma magnitud  $V_p$  rms y las fases están desplazadas en  $120^\circ$  con respecto a  $V_{an}$  seleccionado como el voltaje de referencia, como indica la Fig. 1.4. Para el efecto del análisis consideraremos la secuencia positiva. Este conjunto de voltajes balanceados está caracterizado por:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (1.7)$$

Los voltajes de secuencia abc pueden estar relacionados cada uno a  $V_{an}$ , mediante:

$$\begin{aligned} V_{bn} &= V_{an} \underline{-120^\circ} \\ V_{cn} &= V_{an} \underline{120^\circ} \end{aligned} \quad (1.8)$$

estas relaciones nos serán muy útiles cuando veamos el método de componentes simétricas (ver apéndice A.3).

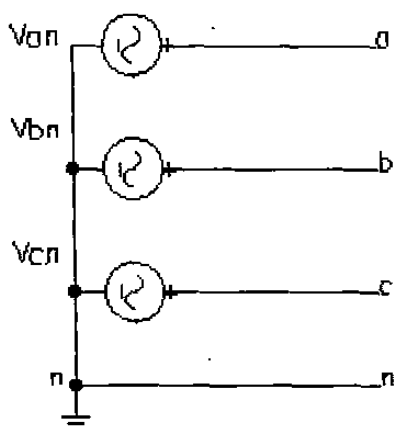


Fig. 1.3. Fuente conectada en estrella.

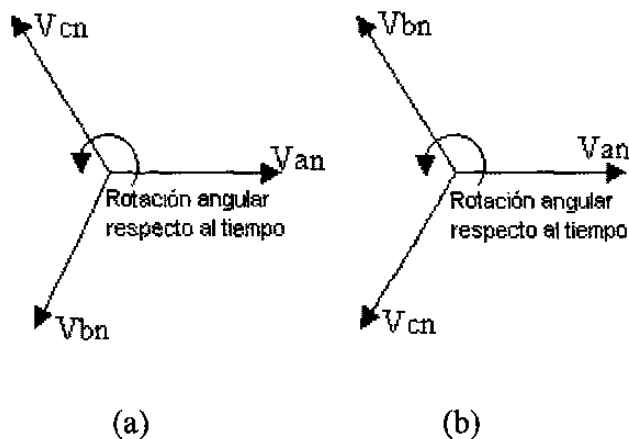


Fig. 1.4. Secuencias de fase, (a) positiva, y (b) Negativa.

Los voltajes de línea a línea, o simplemente voltaje de línea, de la Fig. 1.3 son  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$ , y  $V_{ca}$ , [1], [2], [3], que se obtienen de los voltajes de fase al desplazar  $180^\circ$  cualquiera de las otras fases, por lo tanto:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} + V_{bn} \\ &= V_p \underline{0^\circ} + V_p \underline{60^\circ} \\ &= V_p + V_p(0.5 + j0.866) \\ \therefore V_{ab} &= \sqrt{3} V_p \underline{30^\circ} \end{aligned}$$

de forma similar:

$$\begin{aligned} V_{bc} &= \sqrt{3} V_p \underline{-90^\circ} \\ V_{ca} &= \sqrt{3} V_p \underline{-210^\circ} \end{aligned}$$

si denotamos a  $V_L$  como la magnitud de los voltajes de línea, entonces tenemos la relación

$$V_L = \sqrt{3} V_p \quad (1.9)$$

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_L \angle 30^\circ, \quad V_{bc} = \sqrt{3} V_L \angle -90^\circ, \quad V_{ca} = \sqrt{3} V_L \angle -210^\circ \quad (1.10)$$

Examinando la Fig. 1.4, los voltajes de línea son también un conjunto balanceado cuya magnitud excede por un factor  $\sqrt{3}$ , y están  $30^\circ$  fuera de fase respecto a ellos.

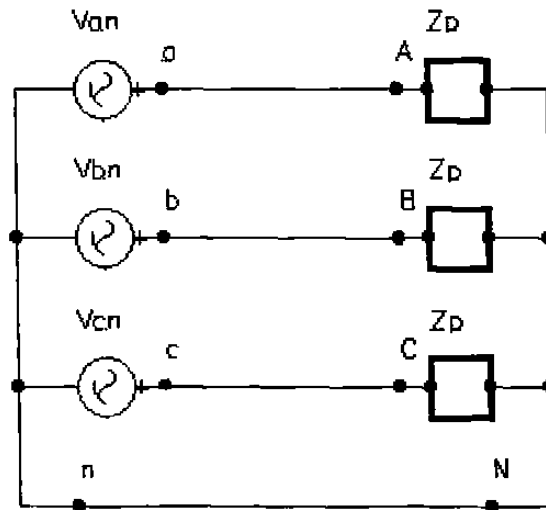


Fig. 1.5. - Sistema de 4 hilos conectado en estrella.

Si interconectamos los neutros como en la Fig.1.5, tendremos un sistema de cuatro hilos trifásico balanceado, este cuarto hilo es una línea neutra que no transmite corriente en este circuito. Aplicando LVK alrededor de las trayectorias cerradas que contienen al hilo neutro, [1], [2], [3], las corrientes de línea son:

$$\begin{aligned} I_{aA} &= V_{an} / Z_p = V_p \angle 0^\circ / Z_p \\ I_{bB} &= V_{bn} / Z_p = V_p \angle -120^\circ / Z_p = V_{an} \angle -120^\circ / Z_p = I_{aA} \angle -120^\circ \\ I_{cC} &= V_{cn} / Z_p = V_p \angle 120^\circ / Z_p = V_{an} \angle 120^\circ / Z_p = I_{aA} \angle 120^\circ \end{aligned} \quad (1.11)$$

Los últimos resultados demuestran también que las corrientes de línea forman un conjunto balanceado, por consiguiente, su suma es:

$$I_{nN} = I_{aA} + I_{bB} + I_{cC} = 0 \quad (1.12)$$

lo que confirma que el hilo neutro no transmite corriente en un sistema balanceado de cuatro hilos [1], [2], [3]. En una conexión Y-Y, las corrientes de línea  $I_L$  son iguales a las corrientes de fases  $I_p$ , entonces, si  $I_L = I_p$  nuestras ecuaciones se convierten en:

$$\begin{aligned} I_{aA} &= I_L \angle \pm\theta = I_p \angle \pm\theta \\ I_{bB} &= I_L \angle \pm\theta - 120^\circ = I_p \angle \pm\theta - 120^\circ \\ I_{cC} &= I_L \angle \pm\theta + 120^\circ = I_p \angle \pm\theta + 120^\circ \end{aligned} \quad (1.13)$$

donde  $\pm\theta$  es el ángulo de la impedancia  $Z_p$ .

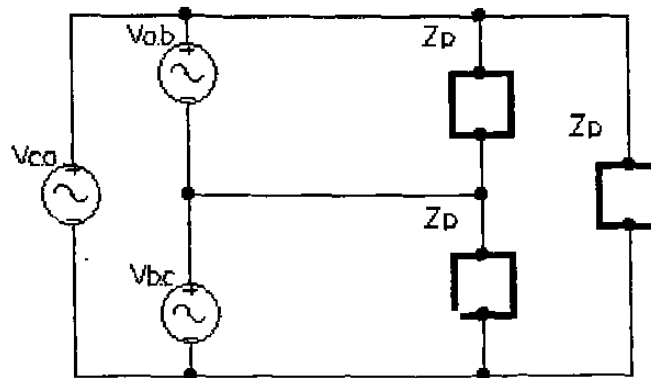


Fig. 1.6. - Diagrama de un circuito conectado en delta.

Consideremos ahora un generador conectado  $\Delta$  a una carga balanceada conectada en  $\Delta$  como el de la Fig. 1.6, podemos ver que en el caso de una carga en, los voltajes de línea son los mismos que los voltajes de fase [1], [2], [3]. Por consiguiente, si los voltajes de línea están dados por las Ec's 10, entonces los voltajes de fase son:

$$V_{AB} = V_L \angle 30^\circ, \quad V_{BC} = V_L \angle -90^\circ, \quad V_{CA} = V_L \angle 150^\circ \quad (1.14)$$

donde:

$$V_L = V_p \quad (1.15)$$

Las corrientes de fase están dadas por:



$$\begin{aligned}
 I_{AB} &= V_{AB}/Z_P = I_p \angle 30^\circ + \theta \\
 I_{BC} &= V_{BC}/Z_P = I_p \angle -90^\circ + \theta \\
 I_{CA} &= V_{CA}/Z_P = I_p \angle 150^\circ + \theta
 \end{aligned}
 \tag{1.16}$$

dónde la magnitud de la corriente de fase está dada por:

$$I_p = V_L / |Z_P| \tag{1.17}$$

La corriente en la línea aA está dada por:

$$I_{aA} = I_{AB} - I_{CA}$$

que al simplificarla es:

$$I_{aA} = \sqrt{3} I_p \angle \pm \theta^\circ$$

las otras corrientes de línea se obtienen de forma similar, y son:

$$\begin{aligned}
 I_{bB} &= \sqrt{3} I_p \angle -120^\circ + \theta \\
 I_{cC} &= \sqrt{3} I_p \angle 120^\circ + \theta
 \end{aligned}$$

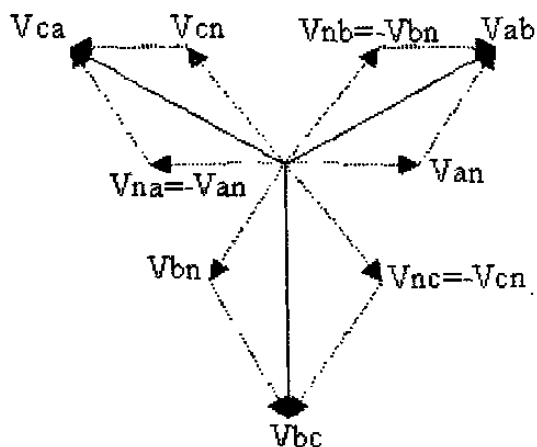


Fig. 1.7. - Diagrama fasorial que muestra voltajes de fase y de línea.

Por lo tanto las relaciones entre las magnitudes de corriente de fase y de línea en el caso de una  $\Delta$  es:

$$I_L = \sqrt{3} I_p \quad (1.18)$$

Las relaciones entre los voltajes de línea y de fase, por la carga conectada en  $\Delta$  aparecen resumidas en el diagrama fasorial de la Fig. 1.7. En un sistema de potencia se pueden hacer conversiones de la conexión  $\Delta$  a la conexión Y, esto se discute en el apéndice A.1.

### 1.3. - COMPONENTES SIMÉTRICAS.

El método de las componentes simétricas se basa en el estudio de tres sistemas equilibrados de vectores de tal forma de que al sumarlos nos dé un sistema desequilibrado en magnitud y ángulo de fase, tal como lo representa la Fig. 1.8. Como discutimos anteriormente, estos vectores son iguales en magnitud pero defasados  $120^\circ$  (ver apéndice A.3), los cuales representan a la secuencia positiva (1) o secuencia **abc** y a la secuencia negativa (2) o secuencia **cba**, y la secuencia cero (0) que son tres vectores iguales en magnitud pero sin defasamiento de fase entre ellos [4], [5], [6].

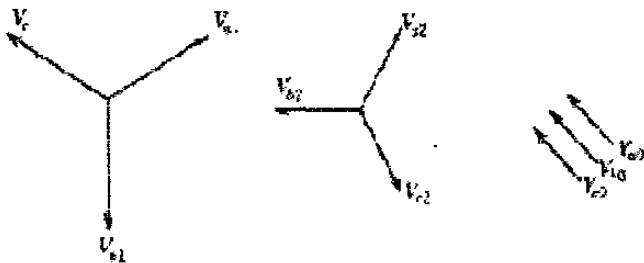


Fig. 1.8. - Tres conjuntos de fasores los cuales son las componentes simétricas de tres fasores desbalanceados.

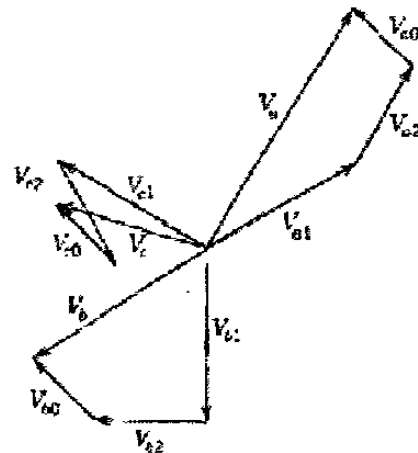


Fig. 1.9. - Adición gráfica de las componentes mostradas en la Fig. 1.8 para obtener tres fasores desbalanceados.

El análisis se basa en el siguiente concepto, de que cada uno de sus fasores desbalanceados es la suma vectorial de los componentes de fasores balanceados [5], [6], [7], expresando estos términos con relación al voltaje tenemos:

$$\begin{aligned}V_A &= V_{A0} + V_{A1} + V_{A2} \\V_B &= V_{B0} + V_{B1} + V_{B2} \\V_C &= V_{C0} + V_{C1} + V_{C2}\end{aligned}\tag{1.19}$$

Este conjunto de los tres fasores desbalanceados a partir de los tres conjuntos de componentes simétricas de la Fig. 1.8, se muestra en la Fig. 1.9. Podemos representar el sistema sobre la base del voltaje  $V_A$  por medio del operador  $a$ , [4], [5], [6], [7], el cual tiene una magnitud igual a la unidad y un ángulo de fase de  $120^\circ$  (ver apéndice A.3), por lo tanto, la representación de los vectores es la siguiente:

$$\begin{aligned}V_A &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\V_B &= V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} \\V_C &= V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}\end{aligned}\tag{1.20}$$

O, en forma matricial;

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}\tag{1.21}$$

si hacemos que:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}\tag{1.22}$$

nuestras incógnitas son los voltajes de secuencia  $V_{a0}$ ,  $V_{a1}$  y  $V_{a2}$ , si multiplicamos por la inversa de la matriz  $A$  ( $A^{-1}$ ) al sistema de Ec's. 21, podemos verificar fácilmente que:

$$A^{-1} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} A = A^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

con lo cual resulta que:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

pero

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

con lo cual resulta que:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

por consiguiente:

$$\begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_A + aV_B + a^2V_C) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B + aV_C) \end{aligned} \quad (1.27)$$

Se sigue un análisis idéntico para el cálculo de las corrientes de secuencia [4], [5], [6], [7], como las ecuaciones anteriores son fundamentales se resume que:

$$I_A = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_B = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (1.28)$$

$$I_C = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

y las corrientes de secuencia son:

$$\begin{aligned} I_{a0} &= 1/3(I_A + I_B + I_C) \\ I_{a1} &= 1/3(I_A + a I_B + a^2 I_C) \\ I_{a2} &= 1/3(I_A + a^2 I_B + a I_C) \end{aligned} \quad (1.29)$$

Como en los circuitos trifásicos, las sumas de las corrientes de líneas son iguales a la corriente en el neutro  $I_n$  en la trayectoria de retorno [4], [5], [6], [7], tenemos que:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (1.30)$$

tomando en cuenta que  $(1 + a + a^2) = 0$ , resulta que la corriente  $I_n$  es igual a:

$$I_n = 3I_{a0} \quad (1.31)$$

En ausencia de una trayectoria a través del neutro en un sistema trifásico (conexión delta),  $I_n$  es igual a cero, y la corriente de línea no tiene componente de secuencia cero, así como en las Ec's 27, se puede demostrar que no hay componente de secuencia cero si la suma de los fasores desbalanceados es cero.

#### 1.4. -REPRESENTACIÓN DEL GENERADOR.

Consideremos a una máquina síncrona bipolar [5] con un rotor cilíndrico como el de la Fig. 1.10a, el devanado del estator trifásico simplificado es representado con un voltaje inducido en las bobinas de fase la cual está determinada por la Ley de Faraday

$$e = N \, d\phi/dt \quad (1.32)$$

El valor rms del voltaje por fase es hallado por medio de:

$$E_{\text{fase}} = 4.44fN\phi_{\text{polo}}K_pK_d \quad (1.33)$$

donde  $f$  es la frecuencia en **Hz**,  $N$  es el número de vueltas por fase,  $\phi_{\text{polo}}$  es el flujo del polo en **Wb.**,  $K_p$  es el factor de corrección de paso y corrige el voltaje para los devanados que no están completamente a  $180^\circ$  (un devanado de paso fraccional cuyo paso es inferior a  $180^\circ$ , reduce los efectos distorsionadores de los armónicos y produce una onda senoidal más pura) y  $K_d$  es el factor de distribución, corrige el voltaje para devanados cuyas vueltas no están concentradas dentro de un par de ranuras, pero están distribuidas a lo largo de la periferia del estator.

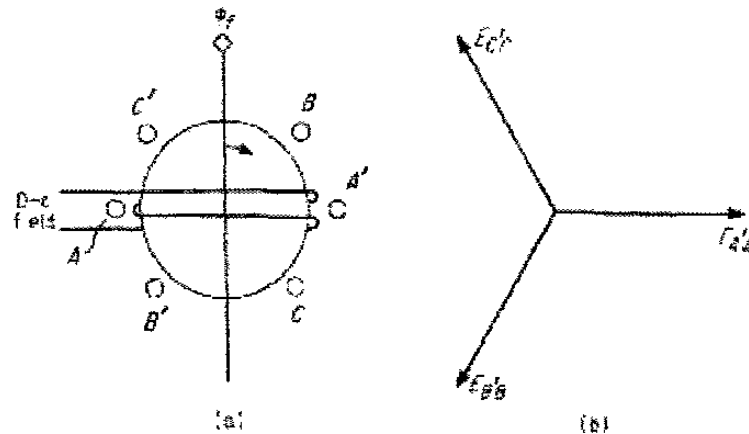


Fig. 1.10. - (a) Representación de una máquina síncrona bipolar con rotor cilíndrico; (b) Desplazamiento de fases.

Los voltajes para las fases **A**, **B** y **C** son iguales en magnitud ya que todos los voltajes dependen directamente del mismo flujo [5]. Sin embargo, el atraso el cual está presente le corresponde al tiempo que  $\phi_f$  (flujo del campo) alcanza las fases **A**, **B** y **C** y es responsable del desplazamiento de fase del voltaje como se muestra en la Fig. 1.10b.

Ahora es conocido que si una carga balanceada se agrega a los devanados de la armadura que separa a los tres flujos de la armadura se podrá distribuir con la densidad pico por el eje magnético de la fase individual de los devanados. El resultado de estos

tres flujos pulsantes nos hacen girar el campo, rotando a la misma velocidad y en la misma dirección del campo principal  $\phi_f$  del rotor, induciendo voltajes senoidales balanceados en los devanados del estator [5], [6]. Como la corriente de campo del rotor es constante, estos voltajes inducidos son independientes de las corrientes del estator y están correctamente modelados como fuentes ideales de voltaje.

El circuito equivalente de la Fig. 1.11 representa a un generador síncrono como un voltaje a circuito abierto en serie con una impedancia síncrona  $R_e + jX_s$ . De acuerdo a los valores ajustados de  $X_s$  se puede ajustar para los efectos de saturación. La simetría de la máquina exige que las tres autoimpedancias, así como las impedancias mutuas sean iguales, la impedancia externa  $Z_n$  es externa a la máquina [7].

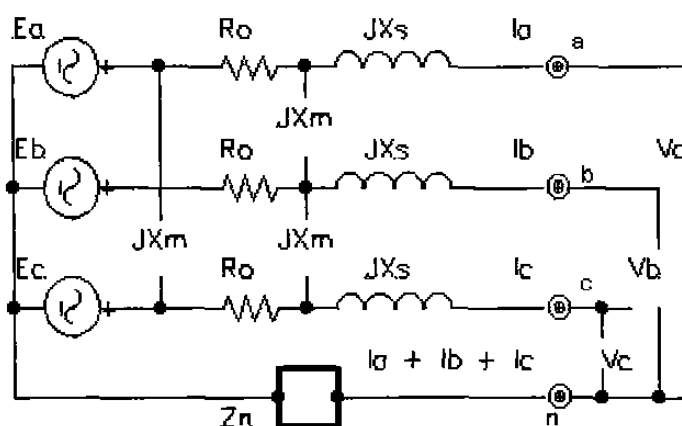


Fig. 1.11. - Circuito equivalente de una máquina síncrona con corriente de campo constante.

Aplicando LVK se producen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} E_a &= (R_e + jX_s + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_b + (jX_m + Z_n)I_c + V_a \\ E_b &= (jX_m + Z_n)I_a + (R_e + jX_s + Z_n)I_b + (jX_m + Z_n)I_c + V_b \\ E_c &= (jX_m + Z_n)I_a + (jX_m + Z_n)I_b + (R_e + jX_s + Z_n)I_c + V_c \end{aligned} \quad (1.34)$$

Si hacemos que:

$$\begin{aligned} Z_s &= R_e + jX_s + Z_n \\ Z_m &= jX_m + Z_n \end{aligned} \quad (1.34A)$$

Y, pasando a notación matricial la ecuación anterior tenemos:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

Tomando como base a las componentes simétricas de las Ec's 28, [7], y tomando en cuenta que  $E_a = E$ ,  $E_b = a^2E$  y  $E_c = aE$ , podemos hacer las siguientes sustituciones que nos simplificarán las Ec's. 35:

$$\begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

multiplicando por la matriz inversa de A (Ec. 25) la ecuación anterior

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.36A)$$

observamos que al efectuar las multiplicaciones de la matriz del lado izquierdo, esta se reduce a:

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ a^2E \\ aE \end{bmatrix} = E/3 [ 1 + a^2 + a, 1 + a^3 + a^3, 1 + a + a^2 ] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 3E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.36B)$$

y por el lado derecho efectuando las operaciones matriciales, tenemos:

$$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_s + Z_m + Z_m & Z_s + a^2Z_m + aZ_m & Z_s + aZ_m + a^2Z_m \\ Z_m + Z_s + Z_m & Z_m + a^2Z_s + aZ_m & Z_m + aZ_s + a^2Z_m \\ Z_m + Z_m + Z_s & Z_m + a^2Z_m + aZ_s & Z_m + aZ_m + a^2Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 3Z_s + 6Z_m & 0 & 0 \\ 0 & 3Z_s - 3Z_m & 0 \\ 0 & 0 & 3Z_s - 3Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{1.36C}
\end{aligned}$$

sustituyendo los valores 36 A, y los de la de la Ec. 34A en la Ec. 36B resulta:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e + j(X_s + 2X_m) + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & R_e + j(X_s - X_m) & 0 \\ 0 & 0 & R_e + j(X_s - X_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{1.36D}$$

Podemos definir las impedancias secuenciales de la máquina como [7]:

$$\begin{aligned}
Z_0 &= R_e + j(X_s + 2X_m) + 3Z_n \\
Z_1 &= R_e + j(X_s - X_m) \\
Z_2 &= R_e + j(X_s - X_m)
\end{aligned} \tag{1.37}$$

y, sustituyendo estos valores en la Ec. 36C

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{1.38}$$

Es muy sencilla la sintetización de los circuitos secuenciales de la Ec. 37, Los resultados se muestran en la Fig. 1.12. Estos circuitos son completamente satisfactorios para aplicaciones al sistema, aunque en la practica se desprecia la resistencia así como los efectos inductivos de la reactancia mutua, que son de valor sumamente pequeños en

comparación con la reactancia síncrona, y son de un valor razonable de exactitud y simplicidad.

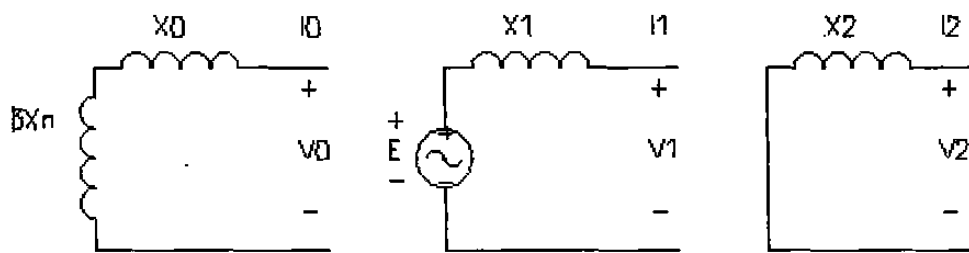


Fig. 1.12. - Circuitos de secuencia de una máquina síncrona.

## 1.5. - REPRESENTACIÓN DEL TRANSFORMADOR.

Los transformadores de potencia son un componente esencial en los sistemas de potencia y que sirve para una diversidad de propósitos, tales como: acoplamiento de impedancias, aislamiento de circuitos eléctricos, transformación de voltaje, etc., cualquiera que sea su propósito, los principios operacionales no cambian aunque sus características de funcionamiento pueden ser diferentes.

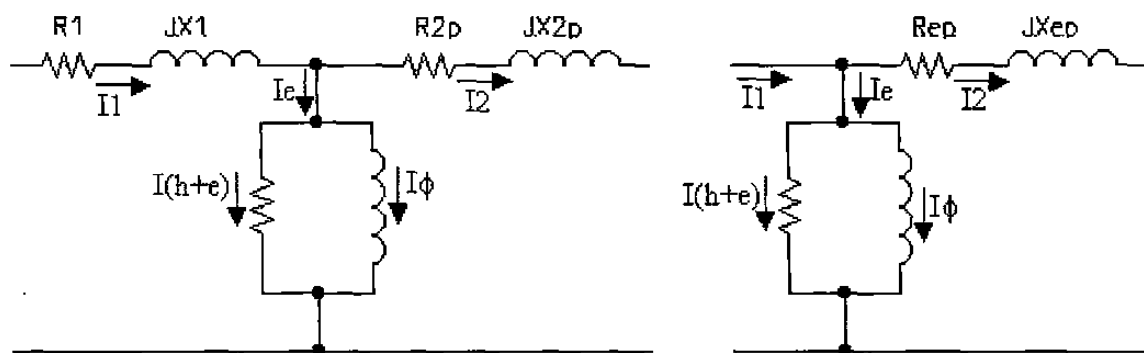


Fig. 1.13. - (a) Circuito equivalente exacto de un transformador de dos devanados; (b) Circuito equivalente aproximado de un transformador de dos devanados.

El tipo de transformador más común es el transformador de dos devanados en cualquiera de los dos casos, monofásico ó trifásico representado sobre una base por fase.

Dos circuitos equivalentes se muestran en la Fig. 1.13, el circuito de la Fig. 1.13a tiene todas las impedancias referidas al lado primario [6]. La impedancia aparente del devanado secundario como vista desde el lado primario es:

$$Z_{2p} = Z_2 (N_p/N_s)^2 \quad (1.39)$$

La Fig. 1.13b es un circuito equivalente aproximado el cual mueve la rama shunt de la izquierda. Esta aproximación se basa directamente en el hecho de que la corriente de excitación  $I_e$  de la rama shunt es muy pequeña con respecto a la corriente de carga, y moviendo ésta rama de la izquierda se tendrá un pequeño efecto sobre la caída  $I_Z$  de la rama serie. Los elementos series  $Z_e$  se juntan en la Fig. 1.13b como [6]:

$$Z_{ep} = Z_1 + (N_p/N_s)^2 \quad (1.40)$$

Se pueden efectuar más aproximaciones en el transformador. Ya que la rama shunt produce pequeñas corrientes de excitación, puede a veces ser omitida como se muestra en la Fig. 1.14. En los grandes transformadores de potencia donde  $X_e \gg R_e$ , una última aproximación se puede hacer despreciando  $R_e$ . Esta reactancia serie  $X_e$  nos representa al transformador.

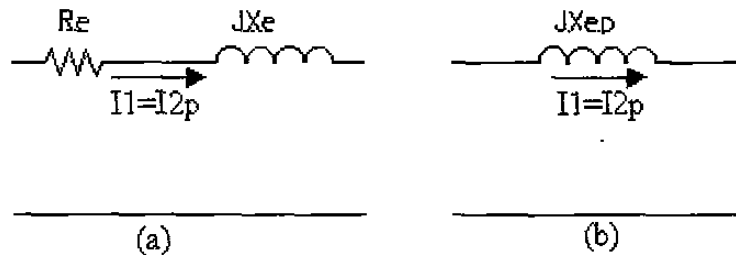


Fig. 1.14. - Otras aproximaciones para los transformadores de dos devanados.

Para su análisis, consideremos el circuito de la Fig. 1.15, la sección en estrella del transformador, con el punto común conectado a tierra por medio de una impedancia  $Z_n$ , y sea [7]:

$$Z_{\phi} = R_{\phi}(jX_{\phi})/(R_{\phi} + jX_{\phi}) \quad \& \quad Z_{\phi 1} = Z_{\phi} + R_1 + jX_1 \quad (1.41)$$

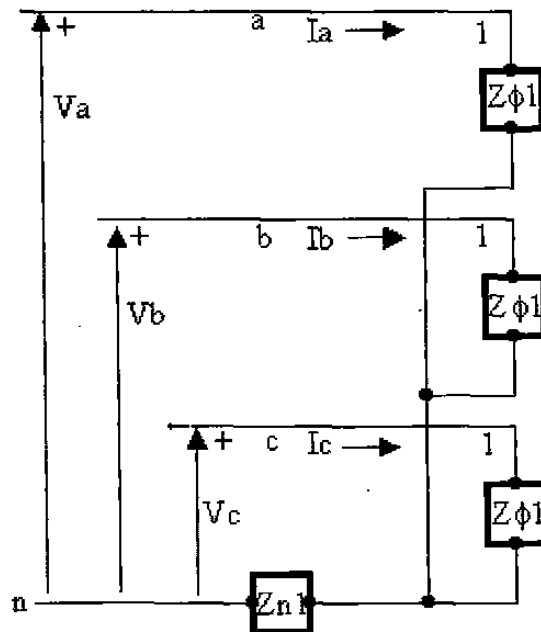


Fig. 1.15. Tres transformadores de tres devanados, con el devanado 1 conectado en estrella a través de  $Z_{n1}$  y devanado 2 y 3 en circuito abierto.

Aplicando LVK se obtiene:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\phi} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{\phi} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{\phi} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

sustituyendo los voltajes y las corrientes en base a sus componentes simétricas resulta:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\phi} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{\phi} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{\phi} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.42A)$$

multiplicando a ambos lados de la ecuación por la inversa de A resulta:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{\phi} + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_{\phi} + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_{\phi} + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.42B)$$

efectuando las multiplicaciones matriciales resulta:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\phi} + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_{\phi} + 3Z_n & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\phi} + 3Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (1.42C)$$

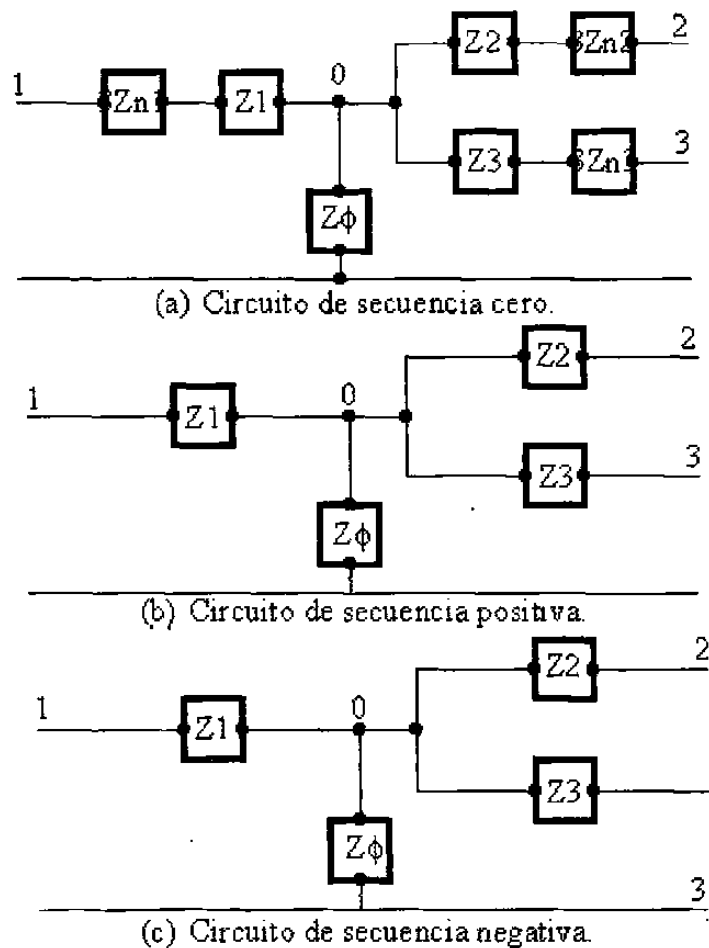


Fig. 1.16. Circuitos de secuencia del transformador correspondiendo a conexiones estrella aterrizada.

Utilizamos esta ecuación para sintetizar la secuencia de los circuitos que se muestran en la Fig. 1.16, en los circuitos resultantes, se pueden calcular secuencias de cantidades independientes en cada red [7]. Si el neutro está solidamente aterrizado, esto quiere decir que  $Z_n$  tiene valor 0, y por lo tanto,  $3Z_n$  será sustituido por un corto circuito. Si la conexión no está aterrizada, significa que  $Z_n$  tiene un valor infinito y que  $3Z_n$  será sustituido por un circuito abierto [5], [6], [7], [8], [9]. Observamos que la puesta a tierra de un equipo solo modifica la secuencia cero de la red, la secuencia positiva y negativa son idénticas y no se ven afectadas. Se sigue un análisis idéntico a la conexión en delta, o transformar la delta a su estrella equivalente.

Para los transformadores de tres devanados, se puede tomar la forma de un transformador monofásico con dos cargas secundarias, el tipo más común es el transformador trifásico Y-Y con el terciario en conexión  $\Delta$ . Sin embargo, el circuito equivalente resultante de la Fig. 1.17a se aplica a los transformadores de tres devanados en general [6].

Se aplican tres pruebas de corto circuito que determinan los valores de  $Z_p$ ,  $Z_s$  y  $Z_t$ . Estas tres pruebas son similares en que en cada caso un devanado está abierto, uno en corto, y el voltaje se aplica en el devanado restante. La impedancia se mide sobre el lado

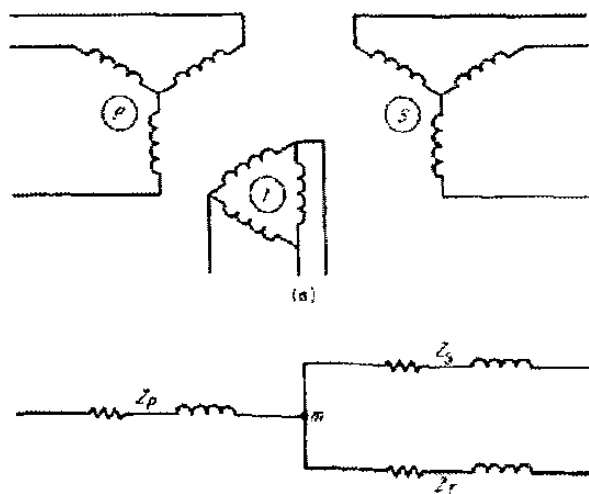


Fig. 1.17. - (a) Diagrama esquemático de un transformador de tres devanados. (b) Circuito equivalente aproximado del transformador de tres devanados.

en la cual el voltaje es aplicado. Un ejemplo de esta prueba se muestra en la Fig. 1.18, la cual muestra el secundario cortocircuitado, el terciario a circuito abierto y el voltaje aplicado en el lado primario [6].

Los resultados de las tres pruebas similares son:

$$\begin{aligned} Z_{ps} &= Z_p + Z_s \\ Z_{pt} &= Z_p + Z_t \\ Z_{st} &= Z_s + Z_t \end{aligned} \quad (1.43)$$

Resolviendo para la Ec. 1.43 para  $Z_p$ ,  $Z_s$  y  $Z_t$ , resulta:

$$\begin{aligned} Z_p &= 1/2 (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= 1/2 (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= 1/2 (Z_{st} + Z_{pt} - Z_{ps}) \end{aligned} \quad (1.44)$$

Estos tres resultados para el circuito equivalente de la Fig. 1.17b tiene despreciada la rama paralelo de la corriente de excitación.

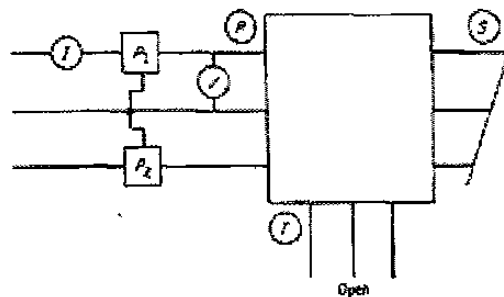


Fig. 1.18. - Prueba de cortocircuito en un transformador de tres devanados

Para el autotransformador de la Fig. 1.19a puede ser representado por una simple impedancia serie ( $Z_e$ ) referida al lado primario [6].  $Z_e$  puede ser hallada por medio de una prueba de corto circuito o puede ser escrita en términos de las impedancias del común y el devanado serie.

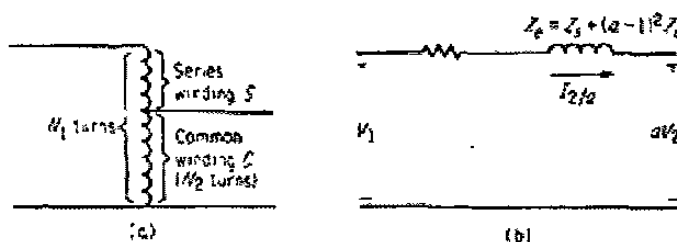


Fig. 1.19. - (a) Diagrama esquemático del autotransformador;  
(b) Circuito equivalente del autotransformador.

Se determina que [6]:

$$Z_e = Z_s + (a - 1)^2 Z_c \quad (1.45)$$

En esta ecuación,  $Z_s$  es la resistencia y la reactancia de enlace del devanado serie o  $Z_s = R_s + jX_s$ . Igualmente  $Z_c$  es la resistencia y reactancia de enlace del devanado común,  $a$  es la relación de  $N_1/N_2$ . En la Fig. 1.19b se ha despreciado la rama de excitación.

## 1.6.- REPRESENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

Para hablar de las líneas de transmisión requeriríamos de todo un capítulo para conocer todos los parámetros que intervienen en el análisis de las líneas, ya sean líneas de transmisión cortas, medias o largas, así como si su arreglo es una línea tipo T ó  $\Pi$ , pero los propósitos de ésta tesis es el de tener una red simplificada y conocer el uso de estos parámetros de importancia primaria en el cálculo [4], [5], [6], [7], [8].

Sea la representación de una línea en su equivalente, en el cual su capacitancia está dividida en dos partes iguales en los extremos de recepción y transmisión, y cuya impedancia está entre las capacitancias. Tres de las variaciones de la línea equivalente están representadas en la Fig. 1.20a de acuerdo a su exactitud. En la Fig. 1.20b se ha despreciado el capacitor, ya que su valor es muy pequeño en comparación al inductor, y



en la Fig. 1.20c se ha despreciado la resistencia ya que las pérdidas que sufre la línea también son muy pequeñas en comparación al inductor, y, por lo tanto, muchas veces se considera el valor de la inductancia como suficiente en exactitud para utilizarla en el estudio de corto circuito, pero no puede ser suficiente para otros tipos de análisis.

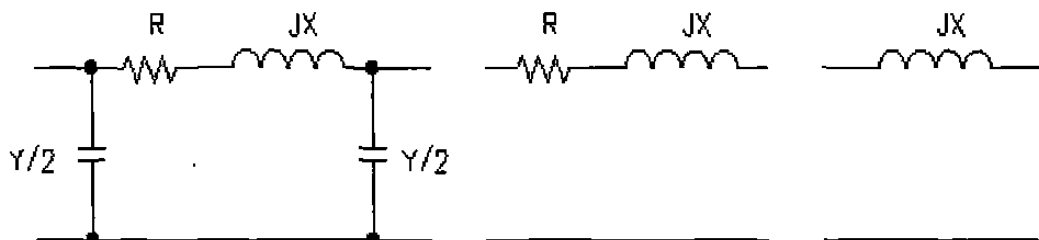


Fig. 1.20. - (a) Circuito equivalente PI, (b) Reducción eliminando los capacitores, (c) Circuito equivalente para efectos de cálculos.

## 1.7. - EL DIAGRAMA UNIFILAR.

En los capítulos previos, se desarrollaron modelos de circuitos para máquinas síncronas, transformadores y líneas de transmisión, ahora, representaremos estos la unión de estos componentes para modelar una red completa. Como un modelo trifásico balanceado se puede representar como un circuito equivalente monofásico compuesto de una de las fases y el neutro de retorno para el análisis balanceados muy raro mostrar más de una fase y el neutro de retorno cuando se representa un diagrama de circuito, éste se simplifica omitiendo el neutro del circuito e indicando las partes que lo componen mediante símbolos estándar en lugar de sus circuitos equivalentes. A este diagrama simplificado de un sistema de potencia se le llama **diagrama unifilar**.

El diagrama unifilar nos suministra en forma objetiva la información significativa del sistema de potencia, pudiendo variar bajo el problema en consideración,

y la cantidad de datos que se incluyen depende del propósito para el que se realiza. En la Fig. 1.21 se muestran algunos símbolos usados comúnmente [5].

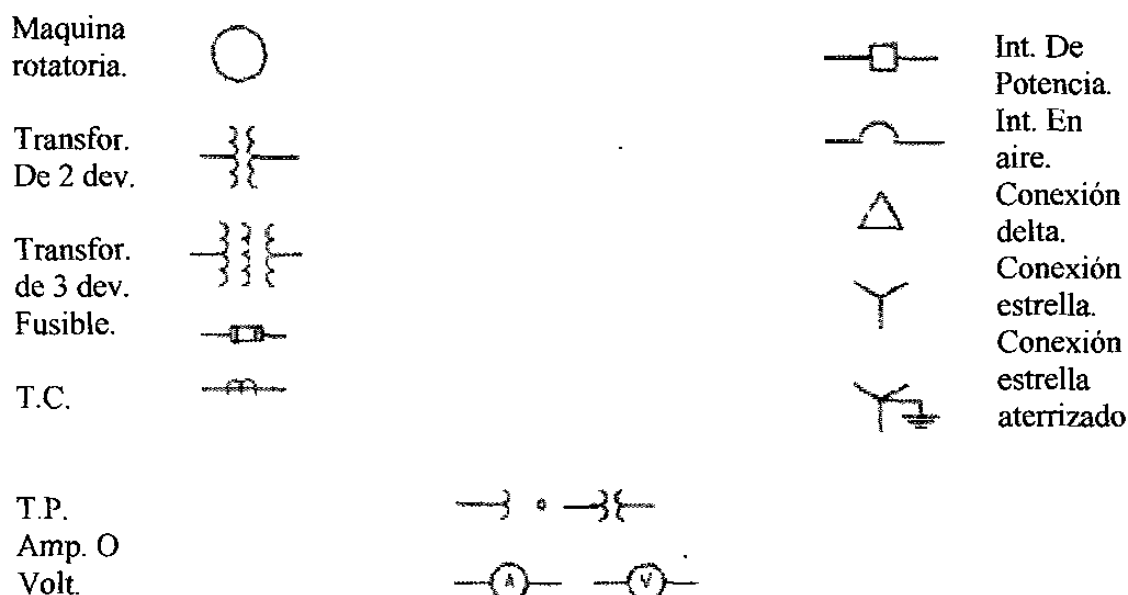


Fig. 1.21. - Símbolos de aparatos y equipos utilizados más comúnmente en redes.

Es de suma importancia conocer la localización de los puntos en que el sistema se aterriza, con el fin de calcular la corriente que fluye cuando ocurre una falla asimétrica en donde se involucre la tierra. En la Fig. 1.22 se muestra el diagrama unifilar de una red [6], mostrando la conexión trifásica Y con el punto neutro aterrizado por medio de una resistencia ( $G_2$ ) y los otros generadores por medio de una reactancia, estas se utilizan para limitar el flujo de corriente a tierra durante una falla de corto circuito, y en cambio los transformadores se representan con el neutro sólidamente aterrizados común dar información sobre el diagrama los valores nominales de todos los componentes que intervienen.

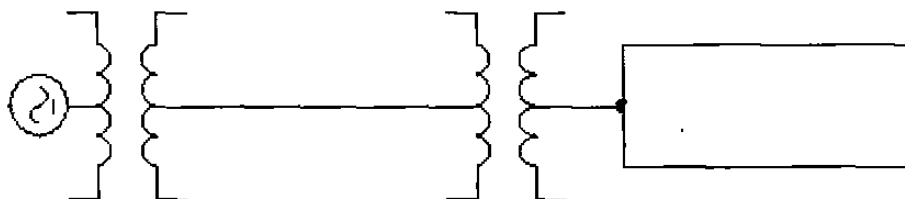


Fig. 1.22. - Diagrama unifilar de un SEP.

## 1.8. - DIAGRAMA DE REACTANCIAS.

El siguiente paso a seguir es dibujar el diagrama de reactancias del sistema de potencia a analizar, en el circuito de la Fig. 1.23 se tiene la representación de todos los componentes del sistema que intervienen en la red de la Fig. 1.22 para formar el diagrama de impedancias [6]. En este diagrama no se incluyen las impedancias limitadoras de corriente que se muestran en el diagrama unifilar entre los neutros del generador y tierra, ya que no fluye corriente a tierra en condiciones balanceadas y los neutros de los generadores están al mismo potencial que el sistema.

Cuando se efectúan cálculos de fallas, es común no considerar las resistencias, esta omisión introduce algún error, pero los resultados son satisfactorios ya que el valor

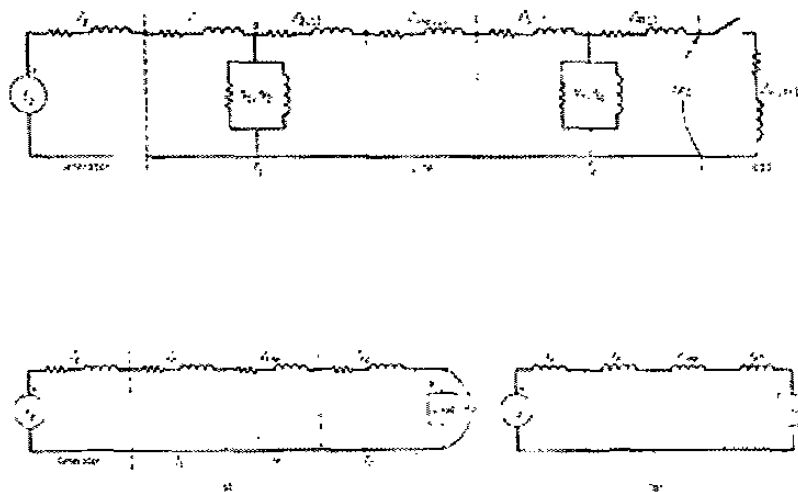


Fig. 1.23. - (a) Diagrama de impedancias del SEP; (b) Omisión de la rama shunt del transformador; (c) Circuito equivalente.

de la reactancia inductiva de un sistema es mucho mayor que su resistencia, por lo tanto la impedancia viene siendo a ser igual a la reactancia inductiva. También, debido a que la corriente de magnetización de un transformador es por lo general insignificante con respecto a la corriente de plena carga, el circuito equivalente del transformador omite la rama de admitancia en paralelo, como se vio en la sección 1.5.

El diagrama de impedancias se reduce al diagrama de reactancias de la Fig. 1.23b, si se decide simplificar el cálculo de la corriente de falla omitiendo las cargas estáticas, las resistencias, la rama de admitancia en paralelo de cada transformador y la capacitancia de la línea de transmisión. A este diagrama también se le conoce como diagrama de secuencia positiva, Fig. 1.23c. [6].

## 1.9. - DIAGRAMAS DE SECUENCIAS.

En la sección 1.4, analizamos al generador síncrono aterrizado por medio de una reactancia, y en la cual obtuvimos la Ec. 37, en esta ecuación observamos que los circuitos que se utilizan para modelar la máquina síncrona se muestran en la Fig. 1.14, estos son los circuitos de secuencia, sobre la base de los voltajes y corrientes de las componentes simétricas, estas redes de secuencia se conocen como secuencia positiva, negativa y cero. Para análisis de estado estable senoidal trifásico balanceado solo se requiere del circuito de secuencia positiva.

Las ecuaciones desarrolladas se basan en un modelo simple de la máquina en el que se supone solo la existencia de las componentes fundamentales de las corrientes, sobre esta base se encuentra que las reactancias de secuencia positiva y negativa son iguales pero muy diferentes a la de secuencia cero.

Sin embargo, las impedancias que presentan las máquinas rotatorias a las corrientes de las tres secuencias, por lo general son diferentes para cada secuencia, pero para los efectos de un cálculo de falla, estas se toman como iguales a la reactancia subtransitoria o transitoria según se estudien las condiciones del problema.

En los transformadores analizados en la sección 1.5, se dijo que los circuitos equivalentes de secuencia, dependen de las conexiones de los devanados primarios y secundarios del transformador si estos están conectados en **Y** o. Las diferentes

combinaciones de los devanados determinan la configuración de los circuitos de secuencia cero, estas conexiones se resumen en la Fig. 1.24. [5].

La representación de las secuencias positivas, negativas y cero, es idéntica en la línea de transmisión, en este caso solo se modifica el valor de la impedancia que se le asigne a la línea.

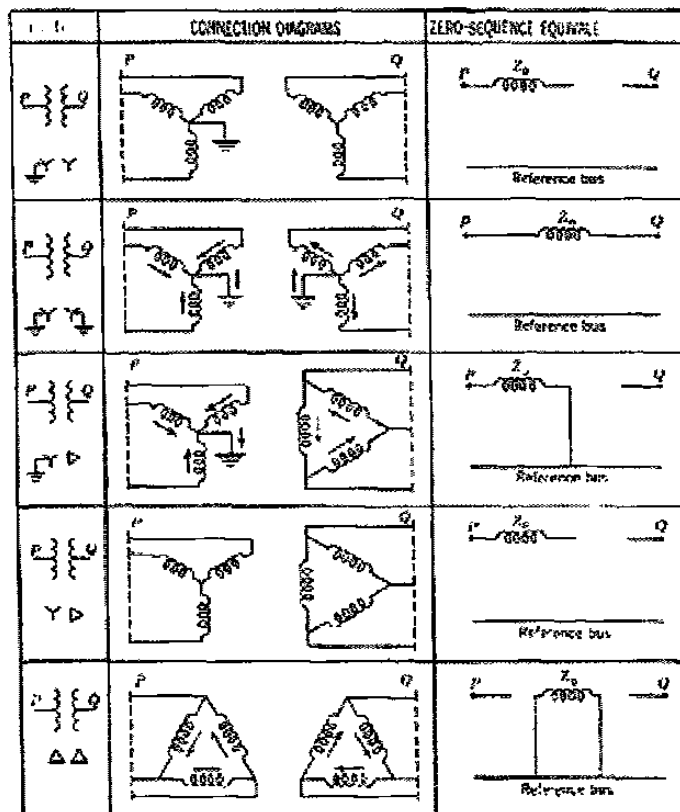


Fig. 1.24. - Circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores trifásicos.

### 1.10. - CANTIDADES EN POR UNIDAD (PU).

Un valor por unidad se define como la relación de la cantidad a su base y se expresa como un valor decimal. Consideremos un sistema monofásico, considerando su potencia aparente como el valor base a través del sistema (se acostumbra a tomar la máxima potencia), y consideremos un voltaje base en el sistema, cuando se utilizan transformadores, el voltaje base de una lado del transformador será diferente al voltaje base del otro lado, en otras palabras, el voltaje base de un devanado en particular será proporcional al número de vueltas sobre ese devanado. Si una componente del sistema (generador, transformador o línea de transmisión) se considera aparte del sistema, los volt-ampere base y el voltaje base se tomarán como la relación de esa pieza en particular del equipo en cuestión, los valores en **pu** necesitan corregirse a la base del sistema cuando se integren. Las siguientes formulas relacionan las siguientes cantidades [5], [6]:

$$\text{Corriente base en Amp.} \quad I_{\text{base}} = \text{kVA}_{1\phi\text{base}} / V_{\text{baseLN}} \quad (1.46)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = V_{\text{baseLN}} / I_{\text{base}} \quad (1.47)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLN}})^2 \times 1000 / \text{kVA}_{1\phi\text{base}} \quad (1.48)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLN}})^2 / \text{MVA}_{1\phi\text{base}} \quad (1.49)$$

$$\text{Potencia base} \quad \text{kW}_{1\phi} = \text{kVA}_{1\phi\text{base}} \quad (1.50)$$

$$\text{Potencia base} \quad \text{MW}_{1\phi} = \text{MVA}_{1\phi\text{base}} \quad (1.51)$$

$$\text{Impedancia en pu de un elemento} \quad Z_{\text{pu}} = Z_{\text{real en } \Omega} / Z_{\text{base}\Omega} \quad (1.52)$$

$$\text{Para cualquier valor} \quad \text{Valor en pu} = \text{valor real} / \text{valor base} \quad (1.53)$$

El valor en **pu** de los  $\text{kVA}_{3\phi}$  sobre los  $\text{kVA}_{3\phi\text{base}}$  es idéntico a los valores en pu de los  $\text{kVA}_{1\phi}$ . La impedancia base y la corriente base se pueden calcular directamente sobre desde valores trifásicos de los kV y KVA base, por lo tanto se tiene [5], [6]:

$$\text{Corriente base en Amp.} \quad I_{\text{base}} = \text{kVA}_{3\phi\text{base}} / \sqrt{3} \text{ kV}_{\text{baseLL}} \quad (1.54)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLL}} / \sqrt{3})^2 \times 1000 / (\text{kVA}_{3\phi\text{base}} / 3) \quad (1.55)$$

$$\text{Voltaje base en} \quad V_{\text{base}} = V_{\text{actual}} \times (\text{relación de transformación}) \quad (1.56)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLL}})^2 \times 1000 / \text{kVA}_{3\phi\text{base}} \quad (1.57)$$

$$\text{Impedancia base en Ohms} \quad Z_{\text{base}\Omega} = (\text{kV}_{\text{baseLL}})^2 / \text{MVA}_{3\phi\text{base}} \quad (1.58)$$

Se hará evidente las ventajas de los cálculos en **pu** cuando los problemas por resolver sean más complejos y en particular cuando se incluyan los transformadores, ya que todo quedará resumido a una sola base.

Cuando la impedancia en pu de una componente del sistema se expresa sobre una base diferente, es necesario convertir la impedancia en pu de una base a otra, debido de que al hacer los cálculos, todas las impedancias de un sistema se deben de expresar sobre la misma impedancia base, por lo tanto, se tiene para cualquier elemento del circuito [5], [6]:

$$\text{Impedancia en pu} \quad Z_{\text{pu}} = Z_{\text{real en } \Omega} \times \text{KVA}_{\text{base}} / ((\text{kV}_{\text{base}})^2) \times 1000 \quad (1.59)$$

para cambiar la impedancia en **pu** sobre una base dada a impedancia en pu sobre una base nueva, se aplica la siguiente ecuación:

$$Z_{\text{nva. pu}} = Z_{\text{dada pu}} (\text{KV}_{\text{dado base}} / \text{KV}_{\text{nvo. base}})^2 (\text{KVA}_{\text{nvo. base}} / \text{KV}_{\text{dado base}}) \quad (1.56)$$

## Aplicación de los conceptos.

PROBLEMA 1. - Iniciaremos esta sección con un problema de un SEP con el fin de aplicar lo anteriormente descrito, sea un SEP [6], [7] con las características que describe el diagrama unifilar representado por la Fig. 1.25 sin carga. Las reactancias de las dos secciones de líneas de transmisión se muestran sobre el diagrama. Los generadores y transformadores tienen los siguientes valores nominales:

Generador 1: 20 MVA, 13.8 KV,  $X'' = 0.20$  pu

Generador 2: 30 MVA, 18 KV,  $X'' = 0.20$  pu

Generador 3: 30 MVA, 20 KV,  $X'' = 0.20$  pu

Transformador T1: 25 MVA, 220 Y/13.8  $\Delta$  KV,  $X = 10\%$

Transformador T2: unidades monofásicas cada una de 10 MVA, 127/18 KV,  $X = 10\%$

Transformador T3: 35 MVA, 220 Y/ 22 Y KV,  $X = 10\%$

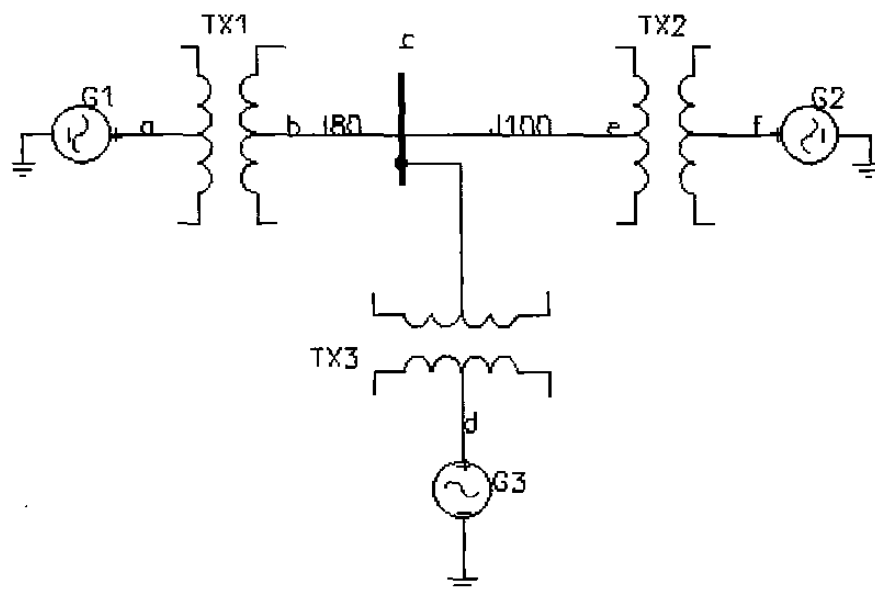


Fig. 1.25. - Diagrama unifilar para el problema 1.

Cada generador tiene reactancias de secuencia negativa y cero de 20 y 5%, respectivamente, sobre la base de sus valores nominales. La reactancia de secuencia cero de la línea de transmisión de B a C es de  $210 \Omega$  y de  $250 \Omega$  en la línea de C a E. A).-



Dibujar los diagramas de secuencia positiva, negativa y cero para el SEP. Señale los valores de todas las reactancias en pu sobre la base de 50 MVA y 13.8 KV en el generador uno. Los neutros de los generadores 1 y 3 se conectan a tierra a través de reactancias limitadoras de corriente de 5%, cada una sobre la base de la máquina a la que está conectada.

B).- Supongamos que el SEP está sin carga y que el voltaje en todo el sistema es de 1.0 pu sobre la base seleccionada en la parte (A). Encuentre el valor del fasor de la corriente de corto circuito en Amperes, si cada generador se representa por su reactancia subtransitoria, cuando ocurre un corto circuito trifásico desde la barra C a tierra.

Solución inciso (A):

De la Ec. 1.56 tenemos que en el generador 1 los valores nuevos de las secuencia (+), (-) y (0) son:

$$X_1 = X_2 = 0.20(13.8/13.8)^2 (50/20) = 0.5 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.05(13.8/13.8)^2 (50/20) = 0.125 \text{ pu}$$

Voltaje base en el generador 2, una forma sencilla para relacionar las áreas de las bases es seccionando el transformador y aplicando el valor del voltaje del equipo por la relación de transformación, y, preguntándonos “hacia adonde vamos y de donde vengo”:

$$V_{\text{base}} = 220 (18/127) = 31.18 \text{ KV}$$

Voltaje base para el generador 3:

$$V_{\text{base}} = 220 (22/220) = 22 \text{ KV}$$

Reactancias en pu del generador 2:

$$X_1 = X_2 = 0.20 (18/31.18)^2 (50/30) = 0.1111 \text{ pu}$$

$$X_0 = 0.05 (18/31.18)^2 (50/30) = 0.0278 \text{ pu}$$

Para el generador 3:

$$X_1 = X_2 = 0.20 \left( \frac{20}{22} \right)^2 \left( \frac{50}{30} \right) = 0.2755 \text{ pu}$$

$$X_0 = .05 \left( \frac{20}{22} \right)^2 \left( \frac{50}{30} \right) = 0.0689 \text{ pu}$$

Reactancias de secuencia (+), (-) y (0) para los transformadores:

Transformador T1:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.1 \left( \frac{13.8}{13.8} \right)^2 \left( \frac{50}{25} \right) = 0.2 \text{ pu}$$

Transformador T2:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.1 \left( \frac{\sqrt{3} \times 18}{31.18} \right)^2 \left( \frac{50}{3 \times 30} \right) = 0.03851 \text{ pu}$$

Transformador T3:

$$X_1 = X_2 = X_0 = 0.1 \left( \frac{22}{22} \right)^2 \left( \frac{50}{35} \right) = 0.1429 \text{ pu}$$

Reactancias para las líneas de transmisión:

Impedancia base para la línea de transmisión B-C: (Ec. 1.55):

$$Z_{base} = \frac{(220)^2}{(50)} = 968 \Omega$$

Reactancias de secuencia (+) y (-):

$$X_1 = X_2 = \frac{80}{968} = 0.0826 \text{ pu}$$

Reactancia de secuencia (0):

$$X_0 = \frac{210}{968} = 0.2169 \text{ pu}$$

Impedancia base para la línea de transmisión C - E, es la misma que para la línea de transmisión B - C,  $Z_{base} = 968 \Omega$ , pero no las de secuencias:

Reactancias de secuencia (+) Y (-):

$$X_1 = X_2 = \frac{100}{968} = 0.1033 \text{ pu}$$

Reactancia de secuencia (0):

$$X_0 = \frac{250}{968} = 0.2583 \text{ pu}$$

Las Fig's 1.26, 1.27 y 1.28 nos dan los circuitos de secuencia (+), (-) y (0), respectivamente.

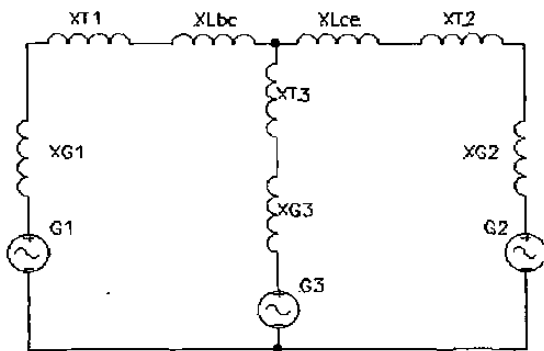


Fig. 1.26. - Diagrama de secuencia (+) del circuito de la Fig. 1.25.

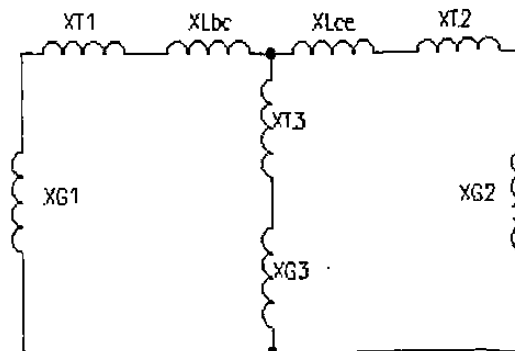


Fig. 1.27. - Diagrama de secuencia (-) del circuito de la Fig. 1.25.

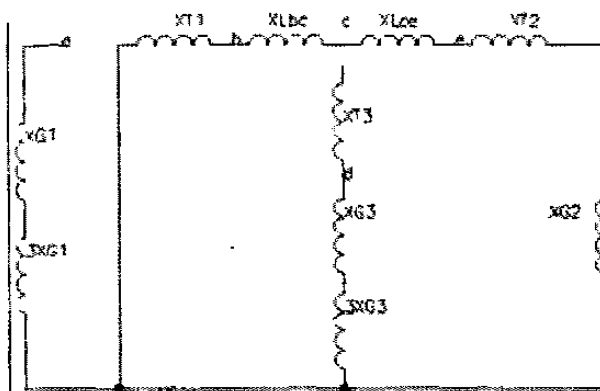


Fig. 1.28. - Diagrama de secuencia (0) del circuito de la Fig. 1.25

Solución inciso (B):

Para una falla trifásica simétrica, consideraremos únicamente el circuito de secuencia (+), debido a que la falla es balanceada, en esta red observamos que hacia la barra C, las reactancias de G1, T1 y LBC se encuentran en serie, así como las de LCD, T2 y G2, T3 y G3, reduciendo el circuito tenemos:

$$\begin{aligned} X_a &= X_{g1} + X_{t1} + X_{bc} = j0.5 + j0.2 + j0.0826 = j0.7826 \text{ pu} \\ X_b &= X_{g2} + X_{t2} + X_{ce} = j0.1111 + j0.0385 + j0.1033 = j0.2529 \text{ pu} \\ X_c &= X_{g3} + X_{t3} = j0.2755 + j0.2 = j0.4755 \text{ pu} \end{aligned}$$

Como todos los valores están interconectados en dos puntos comunes Fig. 1.27, las reactancias se encuentran en paralelo, aplicando un equivalente de Thevenin tenemos:

$$1/X = 1/X_a + 1/X_b + 1/X_c = 1/j0.7826 + 1/j0.2529 + 1/j0.4755 = -j7.3349$$

$$\therefore X = 1/-j7.3349 = j0.1363$$

El circuito resultante se muestra en la Fig. 1.27, ahora procedemos a calcular la corriente base (Ec's 1.50, 1.1 y 1.51), y la de corto circuito:

$$I_{base} = 50000/(\sqrt{3} \times 220) = 157.58 \text{ Amp. Base}$$

$$I_{pu} = 1/j0.1363 = -j7.3349$$

$$I_{real} = 157.58 \times (-j7.3349) = -j1155.85 \text{ Amp.}$$

Una corriente de 1155.85 Amp. pasa a través del bus C a tierra.

## 1.11. - FALLAS ASIMÉTRICAS.

Un sistema de potencia en funcionamiento normal se puede considerar como un sistema balanceado, pero existen situaciones en la cual en un punto determinado el aislamiento puede fallar y hacer contacto con la tierra o con algún otro conductor, y es cuando se dice que ha ocurrido un corto circuito o falla. Las fallas de los SEP se pueden clasificar en cuatro tipos: falla de línea a tierra, falla de doble línea, falla de doble línea a tierra y falla trifásica. Las tres primeras constituyen operación del SEP de operación no balanceada y la última es una condición de falla balanceada. Es importante calcular los valores de voltaje y corriente del sistema durante la condición de falla, de tal forma para que se ajusten los dispositivos de protección para detectar y reducir los efectos perjudiciales que nos ocasionan.

### 1.11.1. - FALLA DE LÍNEA A TIERRA.

Éste tipo de falla es el que se presenta más comúnmente en todas las redes de un SEP, y por su ocurrencia, es el tipo de falla más estudiada. Supongamos que en el circuito de la Fig. 1.29, la fase **a** del generador es aterrizada, las condiciones para éste tipo de falle son:  $I_b = 0$ ,  $I_c = 0$  y  $V_a = 0$ , aplicando las componentes simétricas de las corrientes [5], [6], [7]

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

con lo que deducimos que:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = (1/3) I_a \quad (1.58)$$

y en la cual:

$$I_a = 3I_{a1} \quad (1.59)$$

Ya que el voltaje en la fase **a** es igual a la suma de todas sus partes y tomando en cuenta su condición por lo que:  $V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0$ , deducimos que [5], [6], [7]:

$$-I_{a0}Z_0 + E_a - I_{a1}Z_1 - I_{a2}Z_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad I_{a1}(Z_1 + Z_2 + Z_0) = E_a$$

por lo tanto:

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (1.60)$$

$$\therefore Z_0 = Z_{g0} + 3Z_n$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la corriente de falla, sin embargo, puede también interesarnos el comportamiento del voltaje y la corriente en las otras fases. Ahora, como las corrientes de secuencia son iguales ( $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2}$ ), deducimos que para una falla de línea a tierra las redes de secuencia positiva, negativa y cero están conectadas en serie, tal como se muestra en la Fig. 1.30 [4], [5], [6], [7], [8].

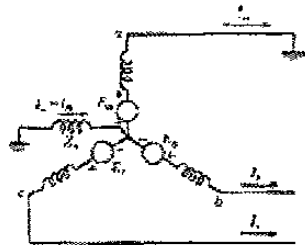
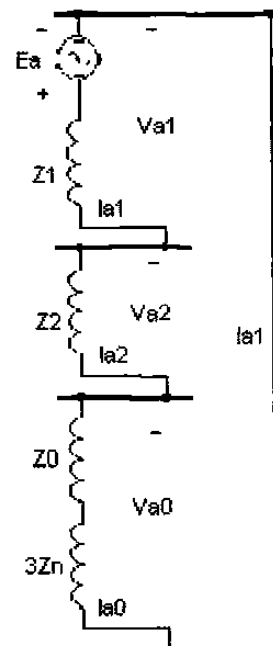


Fig. 1.29 - Diagrama del circuito para una falla de línea a tierra.

Fig. 1.30.- Diagrama de secuencia (+), (-) y (0) para una falla de línea a tierra.



### 1.11.2. - FALLA DE LÍNEA A LÍNEA.

Supongamos ahora que la fase **a** es la fase sin falla. La Fig. 1.31 nos muestra el corto circuito de línea a línea entre la fase **b** y **c**. Las condiciones para esta falla son:  $I_a = 0$ ,  $I_b = -I_c$  y  $V_b = V_c$ , aplicando las componentes simétricas de las corrientes [4], [5], [6]

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

por lo tanto

$$\begin{aligned} I_{a0} &= 0 \\ I_{a1} &= -I_{a2} \end{aligned} \quad (1.62)$$

En las Ec's. 1.62 observamos que la corriente de secuencia cero no influye y que su voltaje debe de ser cero, por lo tanto, los cálculos de una falla de línea a línea no incluye la red de secuencia cero, y , por lo tanto, las redes de secuencia positiva y negativa del circuito deben de estar en paralelo, como lo demuestra el siguiente cálculo, aplicando las componentes simétricas de los voltajes [4], [5], [6]

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1.63)$$

con lo cual:  $V_{a1} = V_{a2}$  y  $V_{a0} = 0$

por medio de las redes de secuencia tenemos:  $V_{a0} = 0$ ,  $V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$  e  $I_{a2} = -I_{a1} Z_2$

con lo que resulta:

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 0 \Rightarrow E_a - I_{a1} Z_1 - I_{a1} Z_2 = 0$$

por lo tanto:

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2) \quad (1.64)$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la corriente de falla, sin embargo, puede también interesarnos el comportamiento del voltaje y la corriente en las otras fases.

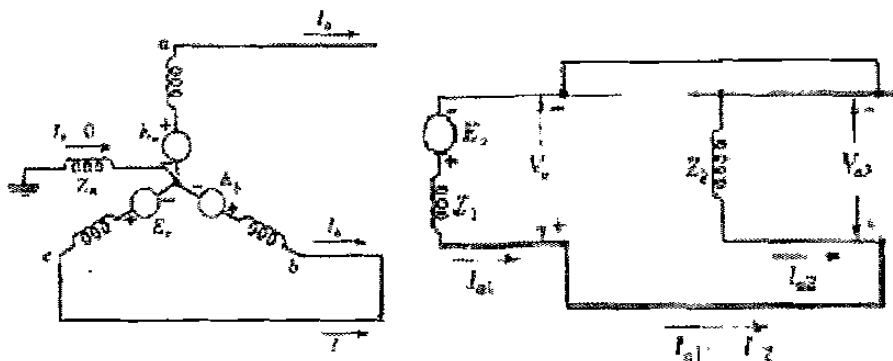


Fig. 1.31. - Diagrama del circuito para una falla de doble línea, y  
Fig. 1.32. - Circuito de secuencia (+) y (-).

Ahora, como las corrientes de secuencia son iguales pero con el signo contrario ( $I_{a1} = -I_{a2}$ ), deducimos que para una falla de línea a línea, las redes de secuencia positiva y negativa están conectadas en paralelo, tal como se muestra en la Fig. 1.32. [4], [5].

### 1.11.3. - FALLA DE DOBLE LÍNEA ATIERRA.

Supongamos ahora que la fase a es la fase sin falla. La Fig. 1.33 nos muestra el corto circuito de doble línea a tierra entre la fase b y c. Las condiciones para esta falla son:  $I_a = 0$  y  $V_b = V_c = 0$ , aplicando las componentes simétricas de los voltajes [4], [5]

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.65)$$

con lo cual deducimos que:

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = (1/3)V_a$$

de esta expresión, deducimos que las redes de secuencia positiva, negativa y cero, para una falla de doble línea a tierra están conectadas en paralelo, tal como nos lo indica la Fig. 1.34. Para encontrar el voltaje de falla, la forma más simple es reducir el circuito serie-paralelo de la Fig. 1.34, y de ahí deducimos que la corriente para una falla de doble línea a tierra es [4], [5], [6]:

$$I_{a1} = E_a / (Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)) \quad (1.66)$$

Esta ecuación se utiliza para determinar la corriente de falla, sin embargo, puede también interesarnos el comportamiento del voltaje y la corriente en las otras fases. Ahora, como las corrientes de secuencia no son iguales debemos de encontrar las otras componentes de la corriente, y tomando en cuenta que  $V_{a0} = V_{a1} = V_{a2}$ , por lo tanto, como  $V_{a1} = E_a - I_{a1} Z_1$  entonces por simple deducción tenemos:



$$\begin{aligned} I_{a2} &= -V_{a1} / Z_2 \\ I_{a0} &= -V_{a1} / Z_0 \end{aligned} \tag{1.67}$$

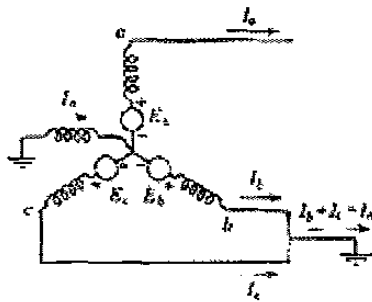


Fig. 1.33. - Circuito para una falla de doble línea a tierra.

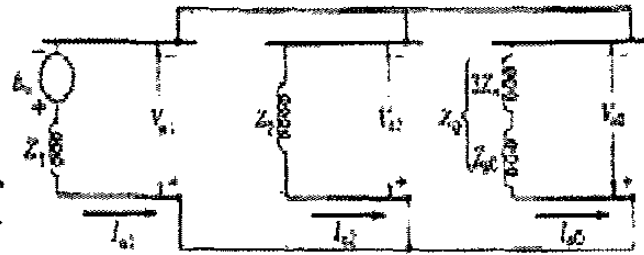
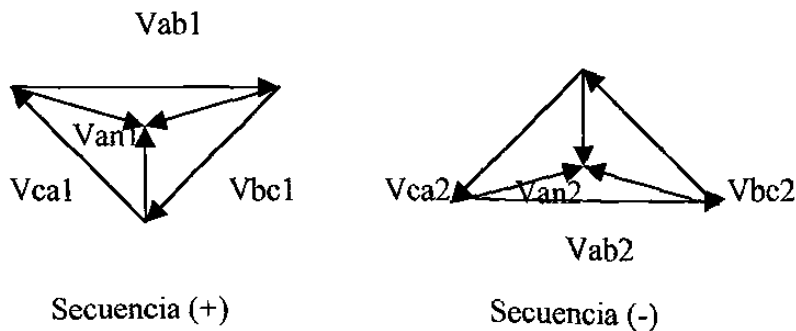


Fig. 1.34. - Conexión de las redes de secuencias (+), (-) y (0), para una falla de doble línea a tierra.

Continuaremos con la aplicación de los conceptos por medio de dos problemas, uno de ellos aplicando el concepto de componentes simétricas y el otro calculando una falla en un SEP.

PROBLEMA 2.- Los voltajes en las terminales de una carga balanceada que consisten en tres resistencias de  $10\Omega$  que están conectadas en Y son  $V_{ab} = 100 \angle 0^\circ$ ,  $V_{bc} = 90 \angle 240^\circ$ , y  $V_{ca} = 95.5 \angle 125.2^\circ$  volts. Encuentre una relación entre las componentes simétricas de los voltajes de línea y de fase, esto es, entre  $V_{ab1}$  y  $V_{an1}$  y entre  $V_{ab2}$  y  $V_{an2}$ . Se asume que no esta conectado el neutro de la carga. Hallar las corrientes de línea a partir de las componentes simétricas de los voltajes de línea dados. Encuentre la potencia que consumen las tres resistencias de  $10\Omega$ , a partir de las componentes simétricas de las corrientes y voltajes.

SOLUCIÓN. El diagrama para los voltajes de secuencia (+) y (-) son:



En forma rectangular los voltajes de fase son:

$$V_{ab} = 100 + j0; \quad V_{bc} = -45 - j77.9423; \quad V_{ca} = -55.0493 + j78.03733 \text{ volts.}$$

De la Ec. 1.27 tenemos:

$$V_{ab1} = 1/3 (100 + 90 \angle 360^\circ + 95.5 \angle 365.2^\circ) = 95.03565 + j2.8851 = 95.1 \angle 1.74^\circ \text{ volts}$$

$$V_{ab2} = 1/3 (100 + 90 \angle 480^\circ + 95.5 \angle 245.2^\circ) = 4.9808 - j2.9168 = 5.77 \angle -30.35^\circ \text{ volts}$$

De las Ec's 1.5 y 1.6 tenemos:

$$V_{an1} = (V_{ab1} \angle -30^\circ) / \sqrt{3} = (95.1 \angle -28.26^\circ) / \sqrt{3} = 54.91 \angle -28.26^\circ = 48.365 - j25.998 \text{ V}$$

$$V_{an2} = (V_{ab2} \angle -30^\circ) / \sqrt{3} = (5.77 \angle -0.35^\circ) / \sqrt{3} = 3.33 \angle -0.35^\circ = 3.33 - j0.02 \text{ V}$$

De la ecuación 1.19 tenemos:

$$V_{an} = V_{an1} + V_{an2} = 51.7 - j26.02 = 57.9 \angle 26.72^\circ \text{ volts}$$

De la Ley de Ohm tenemos

$$I_a = (57.9 \angle -26.72^\circ) / 10 = 5.79 \angle -26.72^\circ \text{ Amp.}$$

Para los demás voltajes tenemos

$$V_{bn1} = 54.91 \angle -148.26^\circ = -46.6979 - j28.9287$$

$$V_{bn2} = 3.33 \angle 119.65^\circ = -1.6474 + j2.8939$$

$$V_{bn} = -48.35 - j26.03 = 54.91 \angle -151.7^\circ \text{ volts}$$

$$I_b = (54.91 \angle -151.7^\circ) / 10 = 5.49 \angle -151.7^\circ \text{ Amps.}$$

$$V_{cn1} = 54.91 \angle 91.74^\circ = -1.6673 + j54.8847$$

$$V_{cn2} = 3.33 \angle -120.35^\circ = -1.6826 - j2.8478$$

$$V_{cn} = -3.35 + j52.04 = 52.15 \angle 93.68^\circ \text{ volts}$$

$$I_c = (52.15 \angle 93.68^\circ) / 10 = 5.22 \angle 93.68^\circ \text{ Amps.}$$

Para la potencia, de las componentes simétricas de las corrientes y voltajes de fase son.

$$S = 3[V_{a0} \ V_{a1} \ V_{a2}] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix}^* = 3 \begin{bmatrix} 0 & 54.91 \angle -28.26^\circ & 3.33 \angle -0.35^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 5.49 \angle -28.26^\circ \\ 0.33 \angle -0.35^\circ \end{bmatrix}^*$$

$$\therefore S = 907.5 + j0 \text{ Var} = \text{Watts}$$

Por lo tanto la potencia activa es igual a la potencia aparente.

Finalizaremos este capítulo con un cálculo de falla de línea a tierra, de un problema de un SEP de los apuntes del M.C. José Manuel Merino Capellini [10], se aplicará el método porcentual. Tomar como base 100 MVA y 110 KV. Calcularemos la falla en el Bus 1.

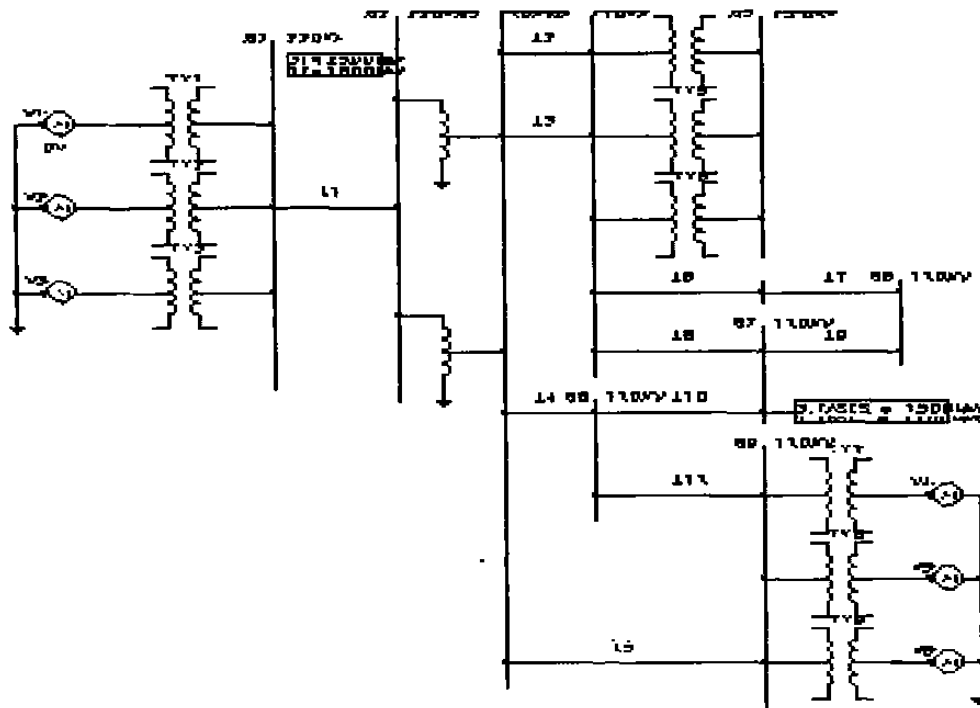


Fig. 1.35. - Sistema de potencia para calcular la falla en el bus 1, utilizando el método de los MVA.

PROBLEMA 3.- Del circuito de la Fig. 1.35, tenemos los siguientes datos:

$$G1 = G2 = G4 = G5 = 94 \text{ MVA}; X''d = X'd = Xd = 17.5\%$$

$$G3 = G6 = 133.33 \text{ MVA}; X''d = X'd = Xd = 13.6\%$$

$$T1 = T2 = 94 \text{ MVA}; Z = 17.09\%$$

$$T3 = T9 = 85 \text{ MVA}; Z = 8.1\%$$

$$T7 = T8 = 56 \text{ MVA}; Z = 8.5\%$$

$$T4 = T5 = T6 = 30 \text{ MVA}; Z = 8.9\%$$

6 autotransformadores monofásicos con terciario en los que cada uno tiene los siguientes datos:  $Z_{hx} = 5.64\%$  a 75 MVA;  $Z_{ht} = 39.8\%$  a 75 MVA y  $Z_{xt} = 11.4\%$  a 75 MVA.

$$L1 : Z1 = Z2 = 5.3\Omega; Z0 = 3.2 \text{ Z1}$$

$$L2 = L3 = 0.054 \text{ a } 200 \text{ MVA}; Z0 = 0.188$$

$$L4 : Z1 = Z2 = 4.35\Omega; Z0 = 3.22\Omega$$

$$L5 : Z1 = Z2 = 5.35\Omega; Z0 = 18.7\Omega$$

$$L6 : Z1 = Z2 = 3.56\Omega; Z0 = 12.4\Omega$$

$$L7 : Z1 = Z2 = 1\Omega; Z0 = 1.5v$$

$$L8 : Z1 = Z2 = 5.99\Omega; Z0 = 20.69\Omega$$

$$L9 : Z1 = Z2 = 4.2\Omega; Z0 = 13\Omega$$

$$L10 = L11 = 0.5\Omega; Z0 = 3.2\Omega$$

SOLUCIÓN: Iniciaremos nuestros cálculos encontrando todos los valores de reactancia aplicando una simple regla de tres:

- a) Para los generadores G1, G2, G4 Y G5:  $(94/0.175) = (100/X); \therefore X = J0.186$
- b) Para los generadores G3 Y G6:  $(133.33/0.136) = (100/X); \therefore X = J0.102$
- c) Para los transformadores T1 Y T2:  $(94/0.1709) = (100/X); \therefore X = J0.1818$
- d) Para los transformadores T3 Y T9:  $(85/0.081) = (100/X); \therefore X = J0.0953$
- e) Para los transformadores T7 Y T8:  $(56/0.085) = (100/X); \therefore X = J0.1517$
- f) Para los transformadores T4, T5 Y T6:  $(30/0.089) = (100/X); \therefore X = J0.2966$
- g) Para los autotransformadores, tenemos que son monofásicos, por lo tanto su potencia es de:  $75 \times 3 = 225 \text{ MVA}$ :  $(225/0.0564) = (100/X); \therefore X = J0.0250 = Zhx; (225/0.398) = (100/X); \therefore X = J0.1768 = Zht; (225/0.114) = (100/X); \therefore X = J0.0506 = Zxt$ ; por lo tanto, de la Ec. 1.44:  $Zh = J0.0756; Zx = J0.0506$ ; y  $Zt = J0.1012$
- h) Para L1, de la Ec. 1.60 tenemos:  $X = (5.3 \times 100)/(220)^2 = J0.0109$
- i) Para L2 y L3:  $(200/0.054) = (100/X); \therefore X = J0.027$
- j) Para L4, de la Ec. 1.60 tenemos:  $X = (4.35 \times 100)/(110)^2 = J0.0359$
- k) Para L5:  $X = (5.35 \times 100)/(110)^2 = J0.0442$
- l) Para L6:  $X = (3.56 \times 100)/(110)^2 = J0.0294$
- m) Para L7:  $X = (1 \times 100)/(110)^2 = J0.0083$
- n) Para L8:  $X = (5.99 \times 100)/(110)^2 = J0.0495$
- o) Para L9:  $X = (4.2 \times 100)/(110)^2 = J0.0347$
- p) Para L10 y L11:  $X = (0.5 \times 100)/(110)^2 = J0.0041$

q) Para la carga de 2500 MVA:  $X = \text{MVAbase}/\text{Pcc}3\phi = 100/2500 = \text{J}0.04$

r) Para la carga de 1500 MVA:  $X = 100/1500 = \text{J}0.0666$

FALLA EN EL BUS 1.- La simplificación del diagrama de reactancias a una reactancia

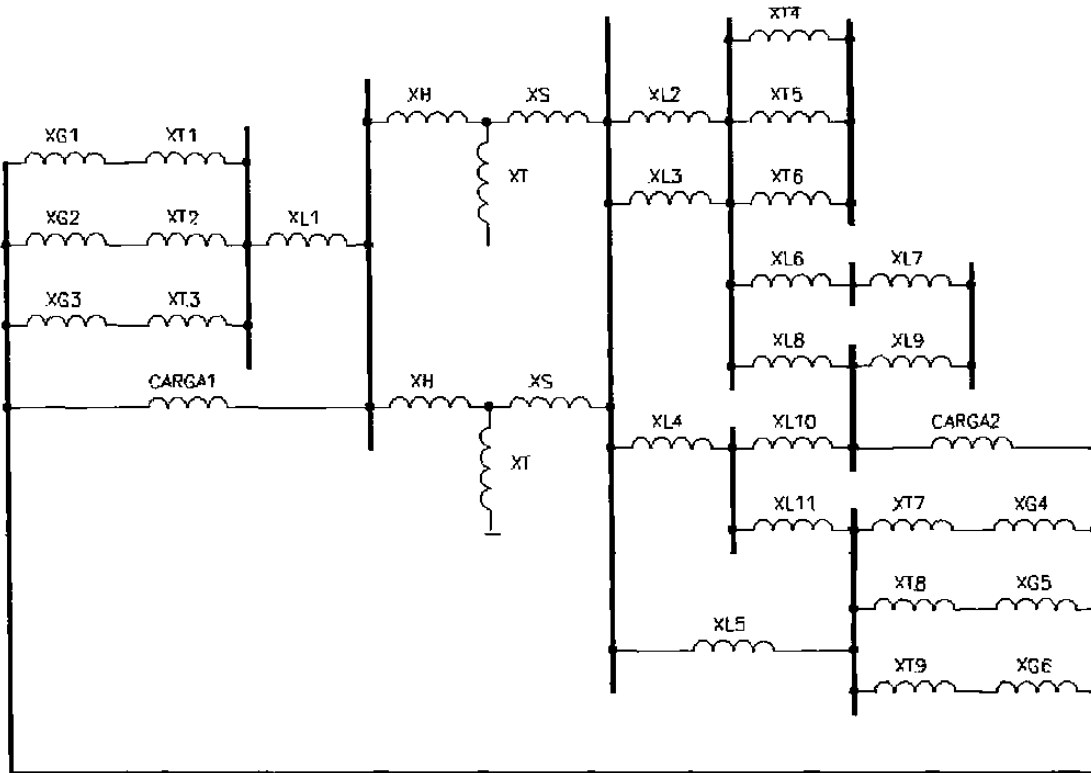


Fig. 1.36. - Diagrama de reactancias del circuito de la Fig. 1.35.

única equivalente se mostrará en las figuras subsecuentes para poder calcular la corriente de falla en el Bus 1. El diagrama de reactancias de la Fig. 1.35 se muestra en la Fig. 1.36.

**SIMPLIFICACIONES:** Para simplificar el circuito, se suman las reactancias en serie y se calculan las reactancias que están en paralelo:

$$X1 = X2 = XG1 + XT1 = j0.186 + j0.1818 = j0.3678$$

$$X3 = XG3 + XT3 = j0.102 + j0.0953 = j0.1973$$

$$X4 = X5 = XT7 + XG4 = j0.1517 + j0.186 = j0.3377$$

$$X6 = XT9 + XG6 = j0.0953 + j0.102 = j0.1973$$

$$(1/X7) = (1/XL2) + (1/XL3) = (1/j0.027) + (1/j0.027); \therefore X7 = j0.0135$$

$$(1/X8) = (1/X_{T4}) + (1/X_{T5}) + (1/X_{T6}) = (1/j0.2966) + (1/j0.2966) + (1/j0.2966);$$

$$\therefore X8 = j0.0988$$

$$X9 = X_{L6} + X_{L7} + X_{L9} = j0.0294 + j0.0083 + j0.0347 = j0.0724$$

Como el terciario del autotransformador es una reactancia flotante, al igual que los transformadores T4, T5 y T6, se pueden despreciar sin que influyan significativamente en nuestros cálculos.

$$X_{10} = X_{11} = X_H + X_S = j0.0756 - j0.0506 = j0.025$$

El diagrama de reactancias simplificado queda como se muestra en la Fig. 1.37

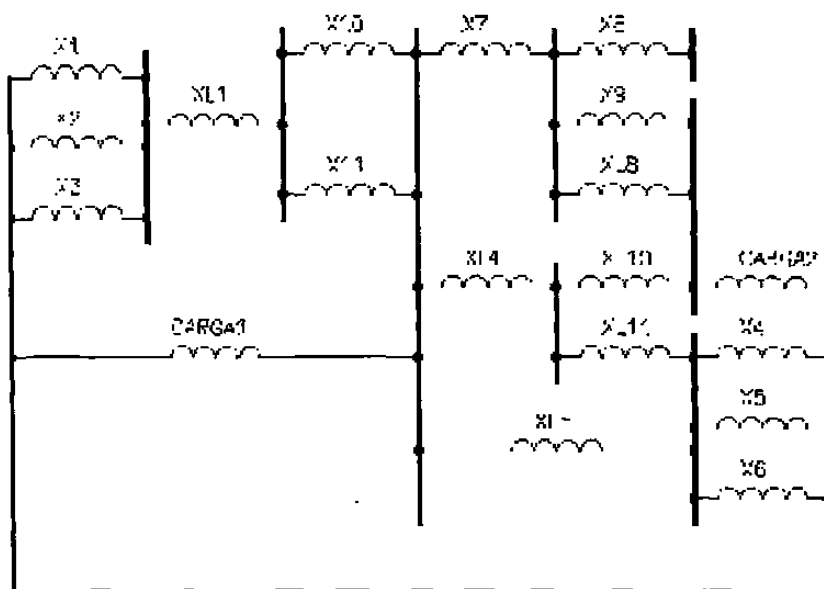


Fig. 1.37 Reducción de la red de la Fig. 1.36.

Continuando con las simplificaciones tenemos:

$$(1/X_{12}) = (1/X_1) + (1/X_2) + (1/X_3) = (2/j0.3678) + (1/j0.1973); \therefore X_{12} = j0.0952$$

$$(1/X_{13}) = (1/X_9) + (1/X_{L8}) = (1/j0.0724) + (1/j0.0495); \therefore X_{13} = j0.0294$$

$$(1/X_{14}) = (1/X_4) + (1/X_5) + (1/X_6) = (2/j0.3377) + (1/j0.1973); \therefore X_{11} = j0.0909$$

$$(1/X_{15}) = (1/X_{10}) + (1/X_{11}) = (2/j0.025); \therefore X_{15} = j0.0125$$

El diagrama simplificado del circuito de la Fig. 1.37 se muestra en la Fig. 1.38

Continuando con la simplificación del circuito tenemos:

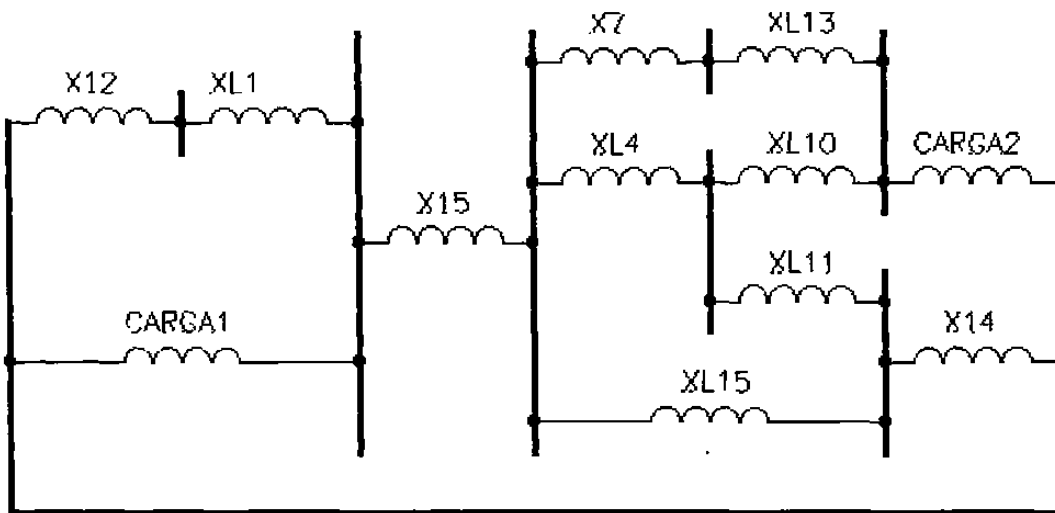


Fig. 1.38. Diagrama simplificado de la Fig. 1.37.

$$X_{16} = X_7 + X_{13} = j0.0135 + j0.0294 = j0.0429$$

El diagrama de reactancias simplificado se muestra en la Fig. 1.39

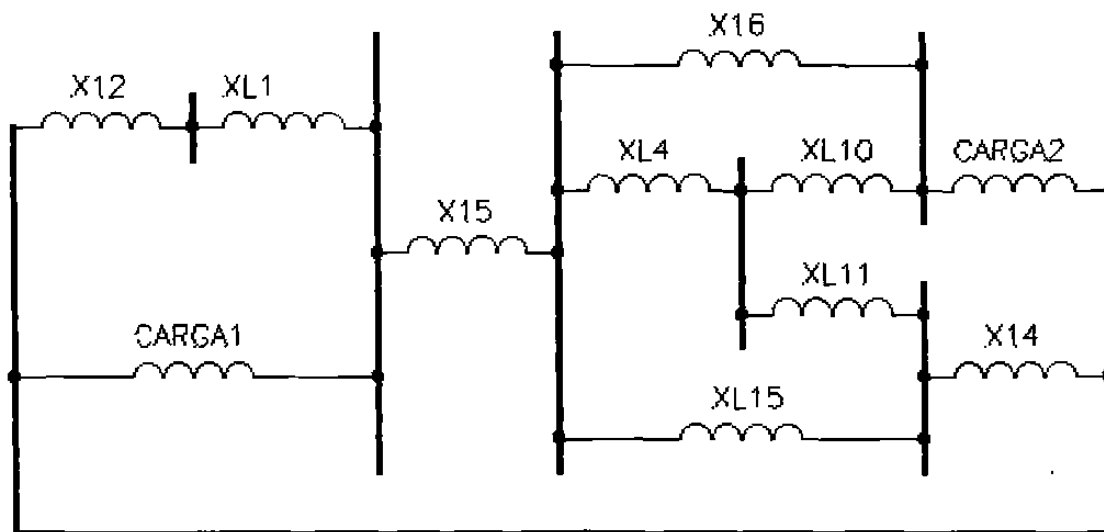


Fig. 1.39. Diagrama simplificado de la Fig. 1.38

Nuestras siguientes reducciones se efectuarán por medio de los equivalentes delta – estrella, de la Ec. B1 tenemos:

$$X_{17} = (X_{16} \cdot X_{L10} + X_{16} \cdot C_2 + C_2 \cdot X_{L10}) / X_{L10} = j^2(0.0429 \cdot 0.0041 + 0.0429 \cdot 0.0666 + 0.0041 \cdot 0.0666) / 0.0041 = j0.8063$$

$$X18 = (X16*XL10 + X16*C2 + C2*XL10)/C2 = j^2 (0.0429*0.0041 + 0.0429*0.0666 + 0.0041*0.0666)/J0.0666 = J0.0496$$

$$X19 = (X16*XL10 + X16*C2 + C2*XL10)/X16 = j^2 (0.0429*0.0041 + 0.0429*0.0666 + 0.0041*0.0666)/J0.0429 = J0.0770$$

$$X20 = (XL11*X14 + XL11*XL5 + XL5*XL11)/XL5 = j^2 (0.0041*0.0909 + 0.0041*0.0442 + 0.0041*0.0442)/J0.0442 = J0.1034$$

$$X21 = (XL11*X14 + XL11*XL5 + XL5*XL11)/X14 = j^2 (0.0041*0.0909 + 0.0041*0.0442 + 0.0041*0.0442)/J0.0909 = J0.0503$$

$$X22 = (XL11*X14 + XL11*XL5 + XL5*XL11)/XL11 = j^2 (0.0041*0.0909 + 0.0041*0.0442 + 0.0041*0.0442)/J0.0041 = J1.115$$

El diagrama de estas simplificaciones resulta el de la Fig. 1.40

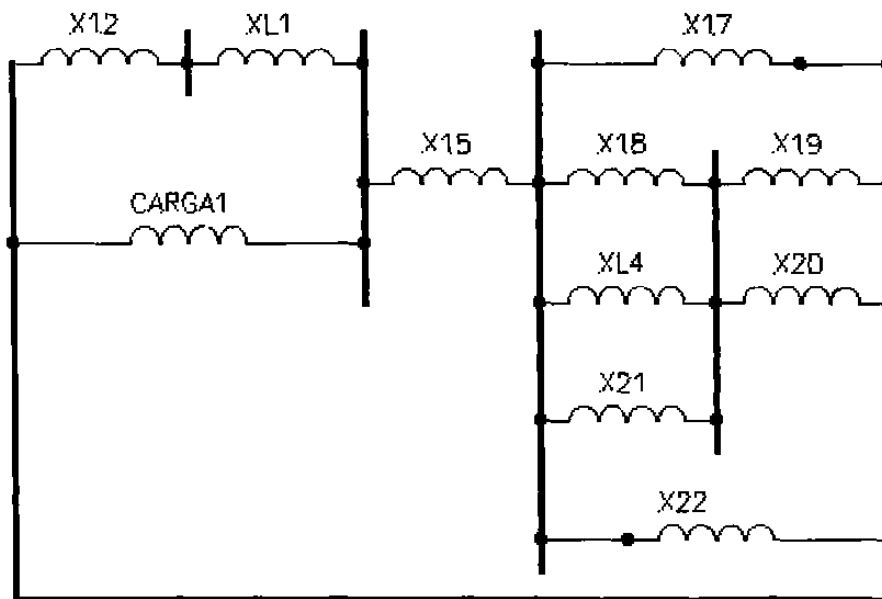


Fig. 1.40. Diagrama simplificado de la Fig. 1.39.

Continuando con nuestras reducciones tenemos:

$$(1/X23) = (1/X18) + (1/XL4) + (1/X21) = (1/J0.0496) + (1/J0.0359) + (1/J0.0503);$$

$$\therefore X23 = J0.0147$$

$$(1/X24) = (1/X17) + (1/X22) = (1/J0.8063) + (1/1.115); \therefore X24 = J0.4679$$

$$(1/X25) = (1/X19) + (1/X20) = (1/J0.0770) + (1/J0.1034); \therefore X25 = J0.0441$$



El diagrama simplificado es el de la Fig. 1.41

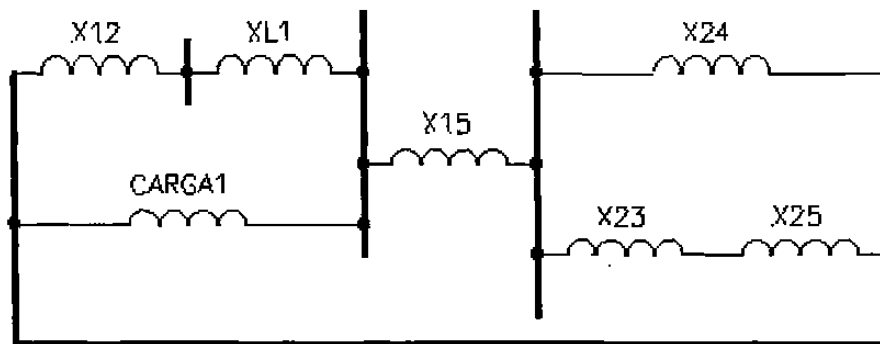


Fig. 1.41. - Diagrama simplificado de la Fig. 1.40.

Reduciendo el circuito serie paralelo

$$X_{26} = \frac{((X_{23}+X_{25}) * X_{24})}{(X_{23}+X_{24}+X_{25})} = \frac{((j0.0147+j0.0441) * j0.4679)}{(j0.0147 + j0.0441 + j0.4679)} = j0.0522$$

El circuito simplificado es el siguientes el de la Fig. 1.42

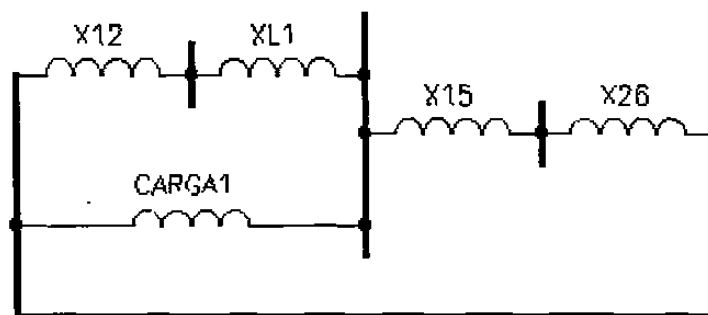


Fig. 1.42. - Circuito simplificado de la Fig. 1.41

Simplificando el circuito, observamos que las resistencias serie X15 y X26, están en paralelo con la carga 1, reduciendo

$$X_{27} = \frac{((X_{15}+X_{26}) * C1)}{(C1+X_{15}+X_{26})} = \frac{((j0.0125+j0.0522) * j0.04)}{(j0.0125 + j0.0522 + j0.04)} = j0.0247$$

Continuando la reducción de la red, observamos que las reactancias XL1 y X27 están en serie y a la vez en paralelo con X12, simplificando tenemos.

$$X_T = ((X_{27}+X_{L1}) * X_{12}) / (X_{12}+X_{L1}+X_{27}) = ((j0.0247+j0.0109) * j0.0952) / (j0.0247+ j0.0109 + j0.0952) = j0.0259$$

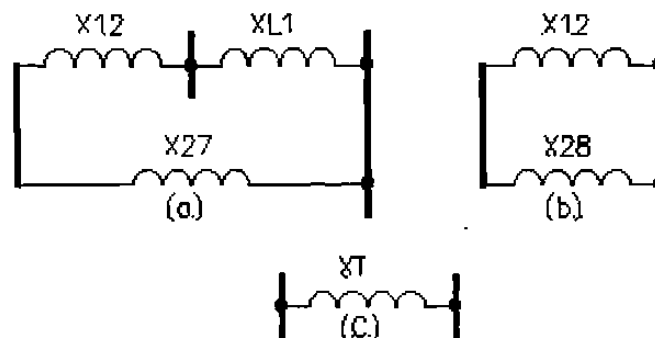


Fig. 1.43. Simplificaciones del diagrama de la Fig. 1.42. (a) Equivalente de X27; (b) Equivalente de X28; y, (c) Circuito equivalente de la Fig. 1.36.

El diagrama simplificado es como el que se muestra en la Fig.1.43, para calcular nuestra corriente de corto circuito, por medio de la potencia tenemos:

$$P_{cc} = MVA_{base} / X_{pu} = 100 / 0.0259 = 3861.0038$$

$$I_{cc3\phi bus1} = P_{cc3\phi} / \sqrt{3} * KV = 3861.0038 \times 10^3 / \sqrt{3} * 220 = 10144.52 \text{ Amperes.}$$

Esta es la corriente que pasará a través del bus 1 en caso de una falla, y aunque es un método aproximado nos da una referencia para tomar las medidas pertinentes.

## **CAPÍTULO 2.**

# **CODIFICACIÓN DE CIRCUITOS EN ESTADO ESTABLE EN PSPICE.**

### **INTRODUCCIÓN.-**

Antes de entrar en detalle con la codificación de circuitos en estado estable, iniciaremos explicando el concepto de fasor, ya que este concepto es muy importante en el análisis de un circuito en estado estable, para que al codificar los elementos que intervienen en nuestro sistema de potencia, se tenga muy presente las cantidades fasoriales compuestas de magnitud y ángulo.

Posteriormente, hablaremos y codificaremos circuitos eléctricos en estado estable utilizando el paquete computacional Pspice, el cual es una herramienta poderosa en el análisis de circuitos eléctricos, tanto monofásicos como polifásicos, en estado estable y transitorio. No nos limitaremos exclusivamente a los circuitos eléctricos, sino también a

los circuitos electrónicos, ya que hoy en día, casi todas las ramas de la ingeniería tienen que ver con la electrónica y sus aplicaciones.

## 2.1. - FASOR Y DIAGRAMA FASORIAL.

Los fasores son números complejos que se representan por vectores en el plano, el cual se conoce como diagrama fasorial y son útiles en el análisis de circuitos en estado estable [1], [2], [3]. Consideremos el circuito de la Fig. 2.1 del cual dibujaremos los voltajes y corrientes en el diagrama fasorial. En este circuito, tomaremos a la corriente  $I$  como referencia, ya que es común a todos los elementos y en base a ello, calcularemos los demás fasores, denotemos a la corriente como:

$$I = |I| \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

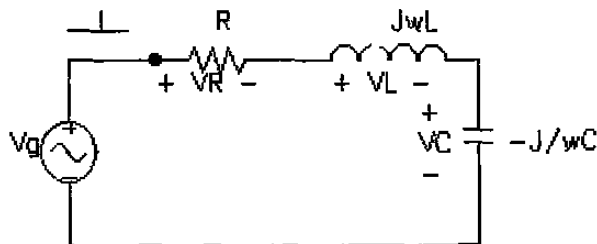


Fig. 2.1. - Circuito de fasores RLC en serie.

el ángulo de  $I$  se asigno arbitrariamente como cero. Los fasores de voltaje del circuito son:

$$V_R = RI = R|I| \quad (2.2)$$

$$V_L = j\omega LI = \omega L |I| \angle 90^\circ \quad (2.3)$$

$$V_C = (-j/\omega C)I = (1/\omega C) |I| \angle -90^\circ \quad (2.4)$$

pero como

$$V_g = V_R + V_L + V_C$$

estas representaciones aparecen en la Fig. 2.2, en donde podemos apreciar tres casos para los diagramas fasoriales [1]:  $|V_L| > |V_C|$ ,  $|V_L| < |V_C|$  y  $|V_L| = |V_C|$ . En el caso (a) la reactancia es inductiva y la corriente está atrasada con respecto al voltaje de la fuente por un ángulo  $\theta$  que puede ser medido, en (b) la reactancia es capacitiva y la corriente se adelanta con respecto al voltaje y en (c) la corriente y el voltaje están en fase porque las componentes inductivas y capacitivas se cancelan una a la otra. Estas conclusiones también se derivan de la ecuación [1], [2], [3]:

$$I = V_g/Z = V_g/(R + j[\omega L - 1/\omega C]) \quad (2.5)$$

Lo anterior se desarrollo únicamente para que se tenga en claro el concepto de fasor, que es la cantidad que se compone de una magnitud y un argumento.

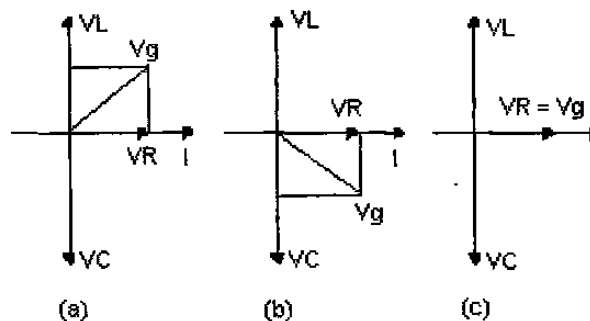


Fig. 2.2. - Diagramas fasoriales de la Fig. 2.1; (a) reactancia inductiva; (b) reactancia capacitiva; (c) resistencia.

## 2.2. - GUIA DE REFERENCIA DEL PSPICE.

En esta sección, daremos una amplia referencia a cerca del software Pspice que nos será muy útil en el análisis y diseño de redes eléctricas, el cual es sumamente importante para la prueba y error, donde podemos probar varios valores de los elementos

de un circuito antes de adoptar aquel que por cuyo efecto sea para un mejor funcionamiento del circuito, [1], [2], [3], [9] [10], [11]. Toda la información descriptiva y de control pasa a Spice en un archivo de texto ordinario que se designa como archivo de entrada de Spice. Este archivo es un conjunto de enunciados separados por la tecla ENTER (↵), con un enunciado por fila, iniciando con el enunciado del título y se termina con el enunciado .END. Entre estos dos enunciados hay tres clases de enunciados: enunciados de lista de red que definen al sistema, enunciados de control y enunciados de comentarios. Los enunciados de lista de red definen al circuito: tipos de elementos, valores, parámetros e interconexiones. Los enunciados de control especifican el modo de análisis, las variables de salida y el tipo de salida que se desea y otra información de control. El enunciado de comentario va precedido de un asterisco (\*) y es una instrucción para que Spice no tome en cuenta esa fila.

El lugar de todas las fuentes y de los elementos de la red y sus direcciones de referencia de voltajes y corrientes quedan indicados especificando sus nodos. Se inicia enunciando un nodo de referencia del circuito como nodo cero, los otros nodos quedan identificados por números enteros y están dados entre las interconexiones de red.

La caída de voltaje entre el nodo X y Y, se indica como  $V(X,Y)$ , con un signo positivo en el nodo X y un signo negativo en el nodo Y (siempre iremos de mas a menos tanto en las fuentes como en los elementos). Si se desea calcular una caída de voltaje entre  $V(X,0)$  se puede abreviar como  $V(X)$ . Las corrientes se indican en la forma  $I(\text{elemento})$ , donde elemento es la codificación que se le asigno a una fuente o elemento de la red y se desea en ese punto conocer el valor de la corriente, por ejemplo  $I(R1)$  es el valor de la corriente a través de la resistencia R1.

## 2.3. - COMO ENTRAR A PSPICE.

Una vez que se ha entrado al archivo Pspice y se tenga la pantalla azul, se siguen los siguientes pasos:

1. - En FILE se da un  $\downarrow$  (Fig. 2.3), y cuando despliegue su ventana, en CURRENT FILE se da otro  $\downarrow$  y aparecerá en la pantalla una ventana, la cual nos pedirá que a la red se le dé un nombre, por ejemplo, podemos llamarle Análisis de estado transitorio, con este nombre se identificará el archivo (Fig. 2.4), después volvemos a llamar a FILE  $\downarrow$  y seleccionamos el comando EDIT y se nos cambiará la pantalla azul a una con un marco verde, es en esta pantalla en donde codificaremos a nuestra red (Fig. 2.5). El nombre que se le asigno a la red es con el fin de que se pueda llamar y hacerle los ajustes necesarios cuantas veces queramos.

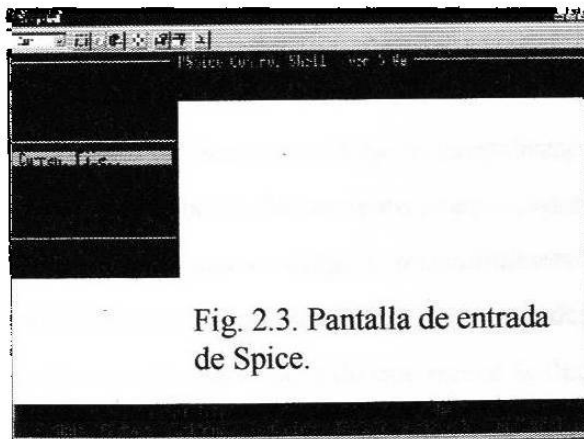


Fig. 2.3. Pantalla de entrada de Spice.

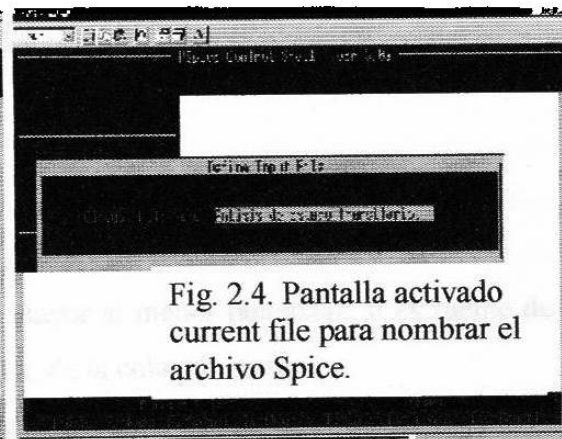


Fig. 2.4. Pantalla activado current file para nombrar el archivo Spice.

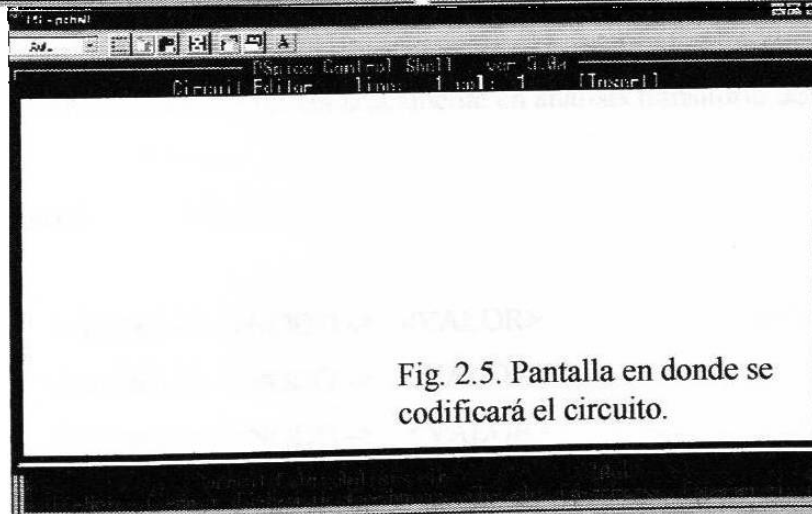


Fig. 2.5. Pantalla en donde se codificará el circuito.

2. - El primer renglón queda restringido al enunciado del título del archivo de entrada Pspice. se utiliza el enunciado de título para identificar al circuito que se estudia por ejemplo:

ANÁLISIS DE ESTADO ESTABLE DEL SISTEMA DE POTENCIA.

si se desean asignarle algunos comentarios, se deberá de iniciar con un asterisco, estos comentarios se pueden colocar indistintamente en cualquier fila de la hoja de cálculo del Spice, por ejemplo:

\*SE DESEA CALCULAR LA CORRIENTE Y VOLTAJE EN EL PUNTO 3.

3. - A continuación se codifican las fuentes y los diversos elementos que intervienen en el circuito a analizar, codificando de la siguiente forma:

Para fuentes independientes de voltaje y corriente:

V<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <TIPO> <VALOR> [ESPECTRO TRANS.]

I<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <TIPO> <VALOR> [ESPECTRO TRANS.]

V denota a la fuente de voltaje independiente.

I denota a la fuente de corriente independiente.

NOMBRE denota a cualquier serie alfanumérica de 1 a 7 caracteres.

NODOS si es fuente de voltaje se toman del mayor al menor potencial, si es fuente de corriente se toma en sentido que indica la flecha, de la cola a la punta.

TIPO es DC por omisión y AC para una fuente senoidal.

VALOR es el valor de la fuente en DC o una magnitud y fase en grados para AC.

ESPECTRO TRANSITORIO se utiliza únicamente en análisis transitorio de un circuito.

Para los elementos:

R<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <VALOR>

L<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <VALOR>

C<NOMBRE> <NODO +> <NODO -> <VALOR>



NOMBRE denota a cualquier serie alfanumérica de 1 a 7 caracteres.

NODOS definen la polaridad de la conexión

VALOR es el valor de los elementos que intervienen en las conexiones, si es de resistencia, se expresa en Ohms, si es un inductor se expresa en Henrys y si es un capacitor se expresa en Faradays.

4. - A continuación se dan los enunciados de control para las soluciones [1], [2], [9], [10], [11], todos los enunciados se inician con un punto (.), los comandos principales para esta tesis son: .AC, .DC, . FOUR, .IC y .TRAN.

.AC éste enunciado se utiliza para calcular la frecuencia de un circuito sobre un rango de frecuencias, como a continuación se describe:

.AC [LIN] [OCT] [DEC] <VALOR (PUNTOS)> <VALOR (FREC. INICIAL)>  
<VALOR (FREC. FINAL)>

LIN esta sentencia nos indica que la frecuencia varía linealmente desde la condición inicial hasta la final, tomando en cuenta el valor de puntos que es el número de puntos en el barrido, las otras sentencia OCT nos efectúa un barrido por octavas y la frecuencia en éste caso es barrida logarítmicamente, al igual que la sentencia DEC pero en décadas, se debe de especificar una sola de estas sentencias.

.DC este enunciado hace que se realice un barrido DC para el circuito y tiene la forma:

.DC <NOMBRE (VARIABLE DE BARRIDO)> <VALOR (INICIAL)> <VALOR (FINAL)> <VALOR (INCREMENTO)>

NOMBRE (VARIABLE DE BARRIDO) es el nombre de una fuente independiente de voltaje o corriente a la cual se le hará un barrido desde una condición inicial hasta una condición final, por medio de un valor de incremento que puede variar desde un solo punto o todo el barrido especificando un sólo punto.

.FOUR éste enunciado es par realizar un análisis de Fourier, la cual realiza una descomposición en componentes de Fourier como resultado de un análisis transitorio, éste enunciado requiere de un enunciado TRAN que se describirá más adelante, y tiene la forma:

FOUR <VALOR (FRECUENCIA)> <VARIABLE DE SALIDA>\*

VARIABLE DE SALIDA es una lista de una o más variables para las que se desean las componentes de Fourier. El análisis de fourier se realiza iniciando con los resultados del análisis momentáneo para las variables de salida especificadas. Para estos voltajes o corrientes, se calculan las componentes DC, la frecuencia fundamental y los armónicos segundo a noveno. La frecuencia fundamental es VALOR (FRECUENCIA) que especifica el periodo para el análisis. El análisis transitorio debe de tener por lo menos una duración de  $1/\langle \text{VALOR (FRECUENCIA)} \rangle$ , segundos.

.IC éste enunciado se utiliza cuando existen condiciones iniciales para el análisis transitorio, tiene la forma:

IC <V (<NODO>) = <VALOR>>\*

En éste caso cada valor es un voltaje que se asigna al nodo para el voltaje del nodo inicial en el instante  $t = 0$  para el análisis transitorio

.TRAN éste enunciado hace que se realice un análisis transitorio en un circuito y tiene la forma:

TRAN <VALOR (ETAPA DE IMPRESIÓN)> <VALOR (TIEMPO FINAL)> [UIC]

El análisis transitorio calcula el comportamiento del circuito respecto al tiempo, iniciándose en el tiempo  $t = 0$  y hacia un VALOR (TIEMPO FINAL). El VALOR (ETAPA DE IMPRESIÓN) es el intervalo de tiempo que se utiliza para graficar o

imprimir los resultados del análisis. La palabra UIC hace que se utilicen condiciones iniciales fijas utilizadas para inductores y capacitores con la especificación IC.

5. - En este punto especificamos los enunciados de control de salida para imprimir o graficar, son los enunciados.PRINT, .PLOT y WIDTH.

.PRINT éste enunciado permite que los resultados de salida en AC, DC o transitorio, aparezcan en forma de tabla, tienen la forma:

```
.PRINT [DC] [AC] [TRAN] [VARIBLE DE SALIDA]*
```

En éste caso AC DC y TRAN son los tipos de análisis que pueden ser salida, se debe de especificar un tipo de análisis, no habiendo límite a la cantidad de variables de salida. El formato de salida (caracteres por línea) queda determinado con el comando.WIDTH

.PLOT éste enunciado permite que los resultados de los análisis transitorio, AC o DC sean en forma de gráficas, tienen la forma:

```
.PLOT [DC] [AC] [TRAN] [VARIBLE DE SALIDA]* + ([<VALOR (LIMITE INFERIOR)>¬ <VALOR (LIMITE SUPERIOR)>])
```

En éste caso AC, DC y TRAN son los tipos de análisis que pueden ser salida, se debe de especificar un tipo de análisis. [VARIBLE DE SALIDA]\* es una lista de las variables de salida deseadas para la gráfica, se permite un máximo de ocho variables de salida en este tipo de enunciados. El rango e incremento del eje x quedan fijos por el análisis que sé gráfica. El rango del eje y puede fijarse añadiendo ([<VALOR (LIMITE INFERIOR)>¬ <VALOR (LIMITE SUPERIOR)>]) a las variables de salida, si no se especifican límites para el eje y, el programa automáticamente determina los límites de la gráfica.

.WIDTH éste enunciado fija la amplitud de la salida, tiene la forma:

`.WIDTH SALIDA = <VALOR>`

En donde valor es el número de columnas y debe ser 80 o 132.

6. - Finalmente, tenemos los enunciados finales, los enunciados de final para los archivos de subcircuitos y circuitos son `.ENDS` y `.END`.

`.ENDS` marca el final de una definición de subcircuito (iniciada por un enunciado `.SUBCKT`), y tiene la forma:

`.ENDS [NOMBRE (SUBCIRCUITO)]`

`.END` marca el final de un archivo.

## 2.4. - CODIFICACIÓN COMO DIAGRAMA UNIFILAR.

En esta sección realizaremos diversas operaciones para codificar y obtener resultados de los circuitos que se analizarán, tanto de C.D. como de C.A., en estado estable y en estado transitorio, variando tiempo y frecuencia para el caso de C.A.

Sea la Fig. 2.6, el circuito a analizar, deseamos calcular todos los valores de voltajes que existen a lo largo de todo el circuito en condición estable C.D. [1].

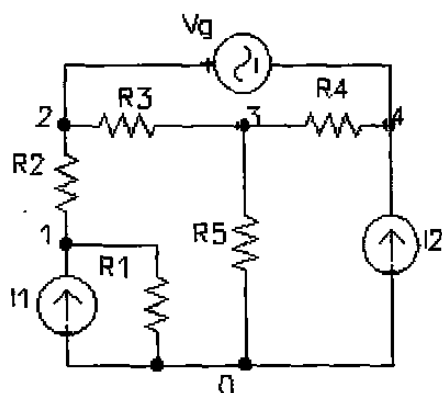


Fig. 2.6. Circuito para el ejemplo 1 con Pspice.

La codificación y su respectiva respuesta del circuito del ejemplo anterior, se nos muestra en la siguiente hoja de cálculo:

```

**** 10/19/98 19:36:55 ***** Evaluation PSpice (September 1991)
*****

OBTENER VOLTAJE EN TODOS LOS PUNTOS DEL CIRCUITO.
****  CIRCUIT DESCRIPTION
*****
*****

I1 0 1 DC 1
R1 1 0 6
R2 1 2 2
R3 2 3 6
R4 3 4 3
R5 3 0 4
I2 0 4 DC 3
V1 2 4 12
.PRINT DC V(1) V(2) V(3) V(4)
.END

**** 10/19/98 19:36:55 ***** Evaluation PSpice (September 1991)
*****

OBTENER VOLTAJE EN TODOS LOS PUNTOS DEL CIRCUITO.
****  SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION    TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
*****

NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE  NODE VOLTAGE
( 1)   14.5710  ( 2)   17.4290  ( 3)    6.2857  ( 4)    5.4286

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME      CURRENT
V1        -3.286E+00

```

TOTAL POWER DISSIPATION 3.94E+01 WATTS

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .05

La salida resultante de Pspice nos muestra los diferentes valores de voltajes de todos los nodos, y que la corriente de la fuente V1 es de  $-3.286$  Amp. La potencia total disipada de 39.4 watts es la potencia emitida por cada fuente independiente, y es un problema D.C. sin que se pida. Sin embargo la potencia disipada por cualquier elemento debe de ser calculada.

Sea la Fig. 2.7 el circuito a analizar con un barrido (sweep) de la fuente de 12 volts, encontraremos como se comporta el voltaje en la resistencia de 5 ohms a los diferentes niveles de voltaje suministrado.

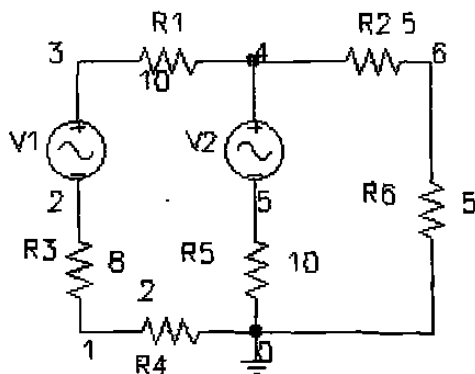


Fig. 2.7. Circuito para analizarlo con la función sweep.

La codificación y su respectiva respuesta del circuito del ejemplo anterior, se nos muestra en la siguiente hoja de cálculo:

\*\*\*\* 10/19/98 23:18:19 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991)

\*\*\*\*\*

ANALISIS CON LA FUNCION SWEEP .DC

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

R4 0 1 2

```

R3 1 2 8
V1 3 2 DC 6
R1 3 4 10
V2 4 5 DC 12
R5 0 5 10
R2 4 6 5
R6 6 0 5
.DC V2 -12 12 2
.PRINT DC V(1) V(2) V(3) V(4) V(5) V(6)
.END

```

\*\*\*\* 10/19/98 23:18:19 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991)

\*\*\*\*\*

ANALISIS CON LA FUNCION SWEEP .DC

\*\*\*\* DC TRANSFER CURVES TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

V2	V(1)	V(2)	V(3)	V(4)	V(5)
-1.200E+01	-9.600E-01	-4.800E+00	1.200E+00	-3.600E+00	8.400E+00
-1.000E+01	-8.800E-01	-4.400E+00	1.600E+00	-2.800E+00	7.200E+00
-8.000E+00	-8.000E-01	-4.000E+00	2.000E+00	-2.000E+00	6.000E+00
-6.000E+00	-7.200E-01	-3.600E+00	2.400E+00	-1.200E+00	4.800E+00
-4.000E+00	-6.400E-01	-3.200E+00	2.800E+00	-4.000E-01	3.600E+00
-2.000E+00	-5.600E-01	-2.800E+00	3.200E+00	4.000E-01	2.400E+00
0.000E+00	-4.800E-01	-2.400E+00	3.600E+00	1.200E+00	1.200E+00
2.000E+00	-4.000E-01	-2.000E+00	4.000E+00	2.000E+00	0.000E+00
4.000E+00	-3.200E-01	-1.600E+00	4.400E+00	2.800E+00	-1.200E+00
6.000E+00	-2.400E-01	-1.200E+00	4.800E+00	3.600E+00	-2.400E+00
8.000E+00	-1.600E-01	-8.000E-01	5.200E+00	4.400E+00	-3.600E+00
1.000E+01	-8.000E-02	-4.000E-01	5.600E+00	5.200E+00	-4.800E+00
1.200E+01	1.776E-16	8.882E-16	6.000E+00	6.000E+00	-6.000E+00

\*\*\*\* 10/19/98 23:18:19 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991)

\*\*\*\*\*

ANALISIS CON LA FUNCION SWEEP .DC

\*\*\*\* DC TRANSFER CURVES TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

V2 V(6)

-1.200E+01 -1.800E+00

-1.000E+01 -1.400E+00

-8.000E+00 -1.000E+00

-6.000E+00 -6.000E-01

-4.000E+00 -2.000E-01

-2.000E+00 2.000E-01

0.000E+00 6.000E-01

2.000E+00 1.000E+00

4.000E+00 1.400E+00

6.000E+00 1.800E+00

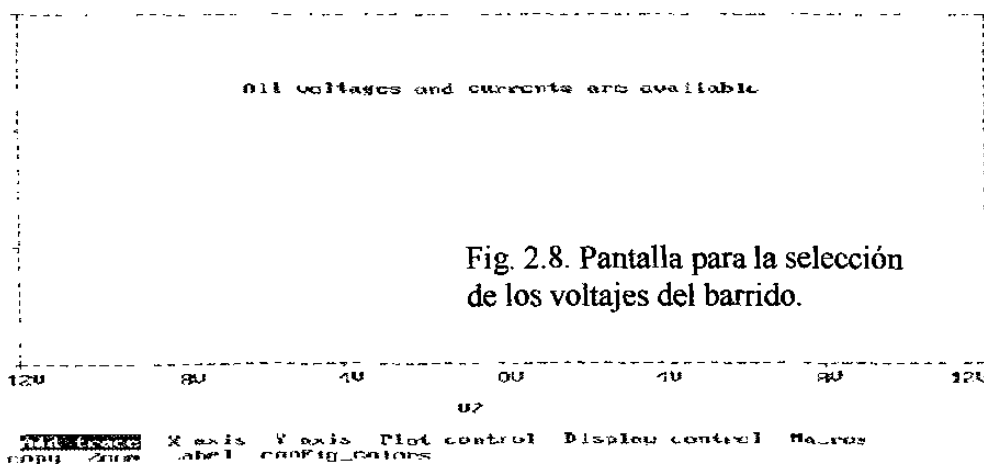
8.000E+00 2.200E+00

1.000E+01 2.600E+00

1.200E+01 3.000E+00

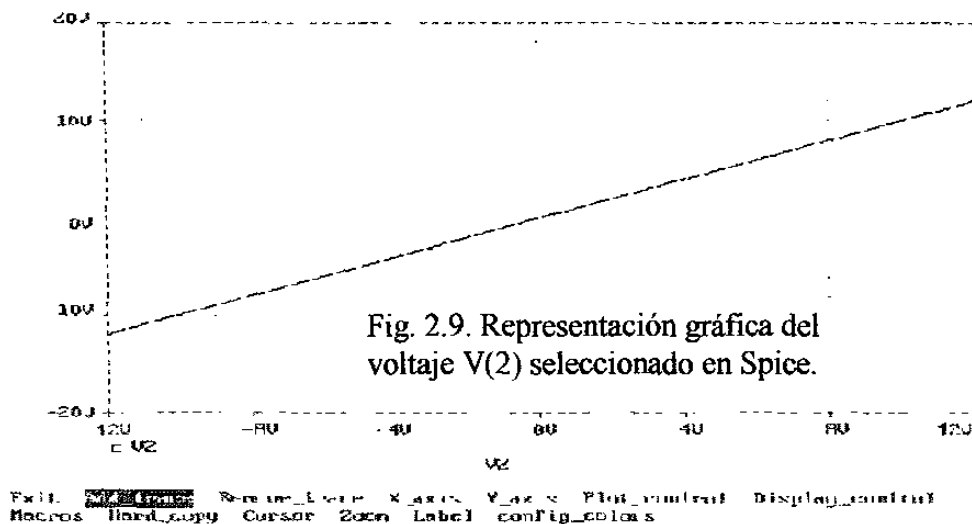
JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .38

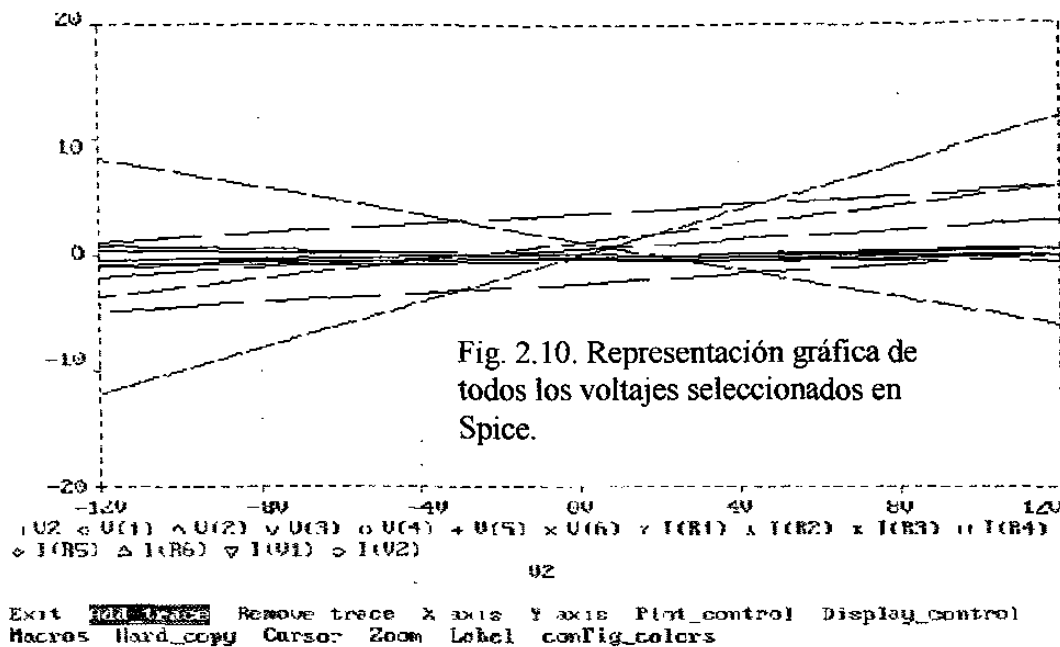




La salida resultante de Pspice nos muestra los diferentes valores de voltajes del barrido que se efectuó en la fuente V2, se le pidió que calculara todos los voltajes de los nodos, y que el voltaje partiera de -12 volts a 12 volts, con incremento de 2 volts, por default en esta versión de Spice nos entrega las gráficas del comportamiento del voltaje,



para poder visualizar estas gráficas se siguen lo siguiente: se nos aparecerá una pantalla con un rotulo que nos indica que todos los valores de voltaje y corriente están disponibles (Fig. 2.8), en la parte inferior hay varias leyendas, la que nos interesa es la que dice adherir trazos (ADD-TRACE), en esta leyenda se da un ↵, y en la parte superior aparecerán los puntos que se quieran trazar ya sea de voltaje o corriente, seleccionamos V2 y Spice nos enviara un titulo diciendo que pulsemos la tecla F4 para que inserte el voltaje V1 y un ↵ (Fig. 2.9), se pueden seleccionar todos los títulos o solo los que nos interese, para este ejemplo, seleccionamos todos, tal como se muestra en la Fig. 2.10.



Para salir de esta pantalla seleccionamos EXIT, y Spice nos enviara a la pantalla de la Fig. 2.11, en donde volveremos a seleccionar Exit-program para que estemos en el editor.

Probe  
 Spicemac Analyzer for Pspice  
 Version 3.0 July 1991  
 Copyright 1985-1991 by Microbit Corporation  
 EVOLUTIVE VERSION. Copying of this program is welcome and encouraged.

Circuit: ~~ANALYSIS~~ ~~CURSOR~~ ~~FUNCTION~~ ~~TRACE~~  
 Batch/lin: cu ~~10~~ ~~20~~ ~~30~~ ~~40~~ ~~50~~ ~~60~~ ~~70~~ ~~80~~ ~~90~~ ~~100~~  
 Temperature: ~~27.0~~

Fig. 2.11. Pantalla para salir del graficador del Spice.

Exit program ~~DELETE~~  
 Hard

Continuando con nuestro análisis, ahora codificaremos circuitos de C.A., cabe hacer mención de que debemos de poner el valor de las fuentes en forma polar, y en el caso en donde haya una función de la onda seno o coseno, ésta se deberá de poner en función de una sola onda senoidal, ya sea seno o coseno, ya que Spice nos codificará estos valores como magnitud y ángulo de fase de la onda seleccionada.

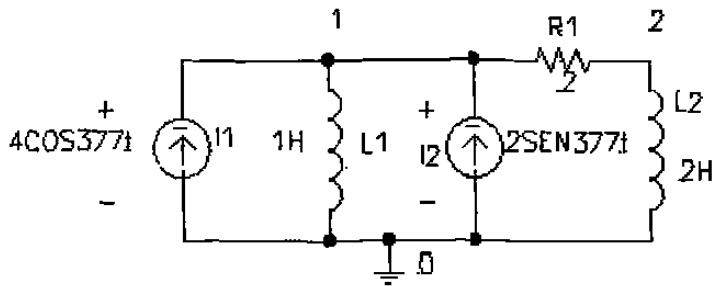


Fig. 2.12. Circuito para análisis de CA.

Del circuito de la Fig. 2.12 [1], deseamos encontrar la respuesta de estado estable de los voltajes y corrientes del circuito. Para este problema haremos la simulación para una variación de frecuencias desde 10 Hz a 60 Hz, y observar la variación del voltaje y de la corriente como a continuación se describe:

```

**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.
****  CIRCUIT DESCRIPTION
*****
*****
I1 0 1 AC 4 0
L1 1 0 1
C1 1 0 0.5
I2 0 1 AC 2 90
R1 1 2 2
L2 2 0 2
[f=377/(2*pi)Hz]
.AC LIN 6 10 60
.PRINT AC VM(1) VP(1) VM(2) VP(2) IR(L1) II(L1) IR(R1) II(R1) IR(C1) II(C1)
.PLOT AC VM(1) VP(1) VM(2) VP(2) IR(L1) II(L1) IR(R1) II(R1) IR(C1) II(C1)
.END
**** 10/21/98 23:48:47 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.
****  SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION    TEMPERATURE = 27.000 DEG C

```

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE

( 1) 0.0000 ( 2) 0.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME CURRENT

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

\*\*\*\* 10/21/98 23:48:47 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

FREQ	VM(1)	VP(1)	VM(2)	VP(2)	IR(L1)
1.000E+01	1.425E-01	-6.343E+01	1.424E-01	-6.252E+01	-2.028E-03
2.000E+01	7.119E-02	-6.343E+01	7.119E-02	-6.298E+01	-5.067E-04
3.000E+01	4.745E-02	-6.344E+01	4.745E-02	-6.313E+01	-2.252E-04
4.000E+01	3.559E-02	-6.344E+01	3.559E-02	-6.321E+01	-1.267E-04
5.000E+01	2.847E-02	-6.344E+01	2.847E-02	-6.325E+01	-8.106E-05
6.000E+01	2.373E-02	-6.344E+01	2.373E-02	-6.328E+01	-5.629E-05

\*\*\*\* 10/21/98 23:48:47 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

FREQ	II(L1)	IR(R1)	II(R1)	IR(C1)	II(C1)
1.000E+01	-1.014E-03	-1.006E-03	-5.230E-04	4.003E+00	2.002E+00
2.000E+01	-2.534E-04	-2.523E-04	-1.287E-04	4.001E+00	2.000E+00
3.000E+01	-1.126E-04	-1.123E-04	-5.689E-05	4.000E+00	2.000E+00
4.000E+01	-6.333E-05	-6.320E-05	-3.192E-05	4.000E+00	2.000E+00
5.000E+01	-4.053E-05	-4.046E-05	-2.039E-05	4.000E+00	2.000E+00
6.000E+01	-2.815E-05	-2.811E-05	-1.415E-05	4.000E+00	2.000E+00

\*\*\*\* 10/21/98 23:48:47 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

LEGEND:

\*: VM(1)

+: VP(1)

=: VM(2)

\$. VP(2)

0: IR(L1)

<: II(L1)

>: IR(R1)

?: II(R1)

FREQ	VM(1)					
(*)-----	1.0000E-02	1.0000E-01	1.0000E+00	1.0000E+01	1.0000E+02	
(+)------	-1.0000E+02	-8.0000E+01	-6.0000E+01	-4.0000E+01	-2.0000E+01	
(\$)------	-6.4000E+01	-6.3500E+01	-6.3000E+01	-6.2500E+01	-6.2000E+01	
(0)------	-3.0000E-03	-2.0000E-03	-1.0000E-03	0.0000E+00	1.0000E-03	
(<>)------	-1.5000E-03	-1.0000E-03	-5.0000E-04	0.0000E+00	5.0000E-04	
(?)-----	-6.0000E-04	-4.0000E-04	-2.0000E-04	5.4210E-20	2.0000E-04	

1.000E+01	1.425E-01	.	?	X X	+	.	\$.	.
2.000E+01	7.119E-02	.		X.	+	.\$	?X	.
3.000E+01	4.745E-02	.		X	.	\$.+	?X	.
4.000E+01	3.559E-02	.		X	.	\$.+	X.	.
5.000E+01	2.847E-02	.		X	.	\$.+	X.	.
6.000E+01	2.373E-02	.		X	.	\$.+	X.	.

\*\*\*\* 10/21/98 23:48:47 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

ANALISIS EN ESTADO ESTABLE DE UN CIRCUITO DE C.A.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

LEGEND:

\*: IR(C1)

+: II(C1)

FREQ	IR(C1)	IR(C1)	IR(C1)	IR(C1)	IR(C1)
(*)-----	4.0000E+00	4.0010E+00	4.0020E+00	4.0030E+00	4.0040E+00
(+)-----	2.0000E+00	2.0005E+00	2.0010E+00	2.0015E+00	2.0020E+00

1.000E+01	4.003E+00	.	.	.	*+	.
2.000E+01	4.001E+00	.	X	.	.	.
3.000E+01	4.000E+00	.	X	.	.	.
4.000E+01	4.000E+00	.	X	.	.	.
5.000E+01	4.000E+00	.	X	.	.	.
6.000E+01	4.000E+00	.	X	.	.	.

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .33

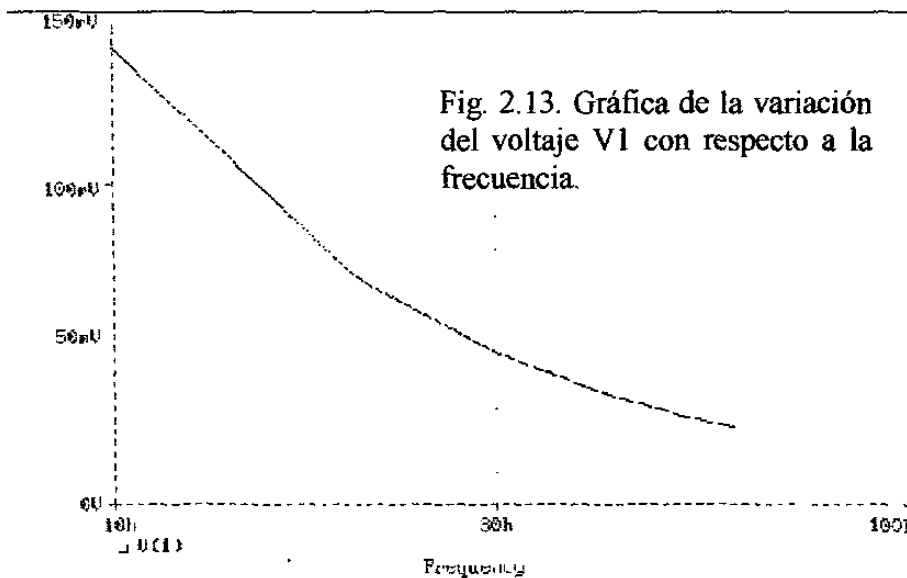
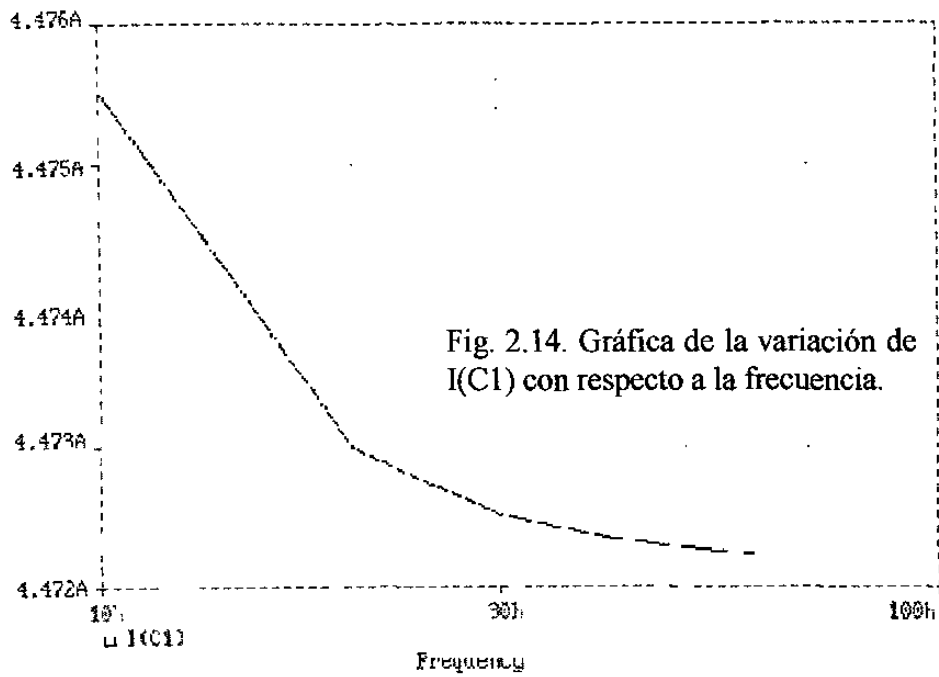
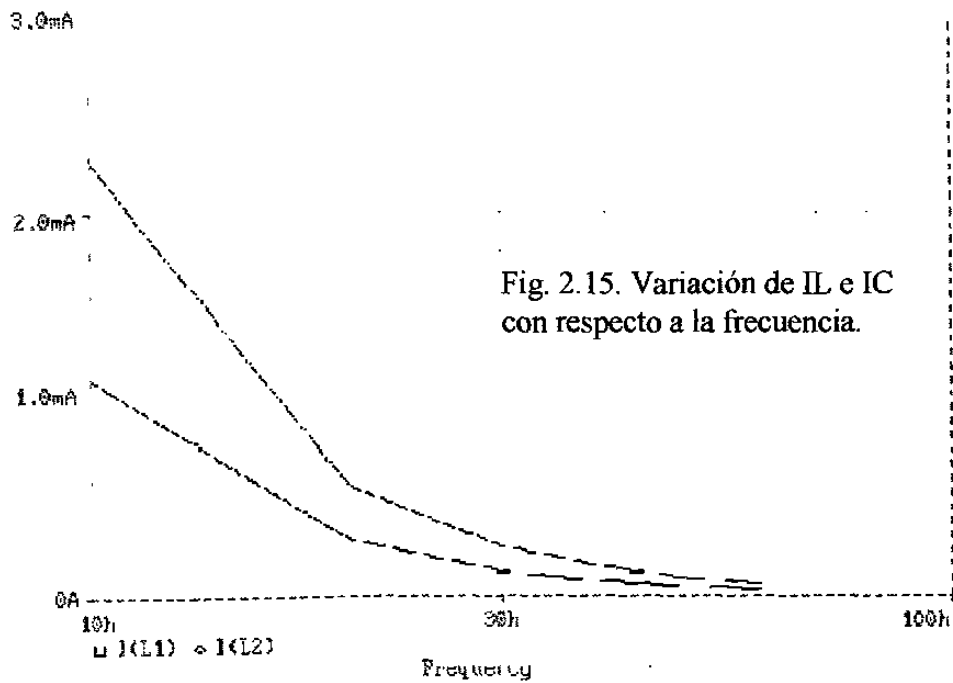


Fig. 2.13. Gráfica de la variación del voltaje V1 con respecto a la frecuencia.

Exit **Ctrl+Q** Remove trace X axis Y axis Plot control Display control  
 Macro Hard copy Cursor Zoom Label Config values



dl **Plot Trace** Remove trace X axis Y axis Plot control Display control  
 cursor Hard copy Cursor Zoom Label config colors



Exit **Plot Trace** Remove trace X axis Y axis Plot control Display control  
 Macros Hard copy Cursor Zoom Label config colors

En estas gráficas observamos que tanto el voltaje como la corriente varían en función de la frecuencia, disminuyendo su valor al aumentar la frecuencia.

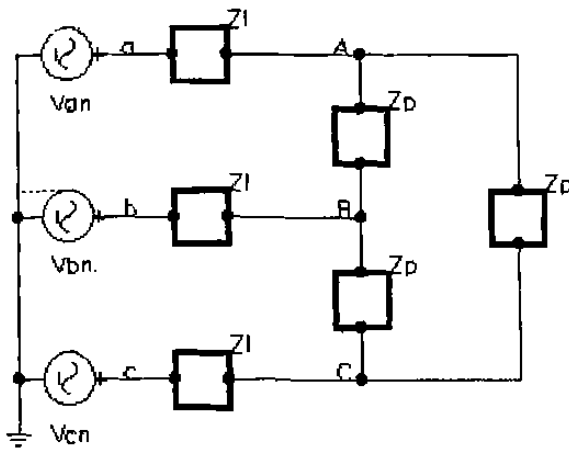


Fig. 2.16. Circuito trifásico para su análisis de estado estable.

Continuaremos con el análisis de un circuito trifásico Y- $\Delta$  (Fig. 2.16) [1], de secuencia (+), con voltaje de 1200 volts,  $Z_l = 0.5\Omega$  y  $Z_p = 8 + j2\Omega$ , encontraremos los voltajes y corrientes en todos los puntos del sistema [1]. Spice nos da los siguientes resultados:

\*\*\*\* 10/22/98 02:05:20 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA TRIFASICO.

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

VAN 1 0 AC 1200 0

VBN 2 0 AC 1200 -120

VCN 3 0 AC 1200 120

R1 1 4 0.5

R2 2 5 0.5

R3 3 6 0.5

R4 4 7 8

R5 5 8 8



```

R6 4 9 8
L1 7 5 0.005305
L2 8 6 0.005305
L3 9 6 0.005305
.AC LIN 1 60 60
.PRINT AC VM(4,5) VP(4,5) IM(VAN) IP(VAN) IM(R4) IP(R4)
.PRINT AC VM(5,6) VP(5,6) IM(VBN) IP(VBN) IM(R5) IP(R5)
.PRINT AC VM(6,4) VP(6,4) IM(VCN) IP(VCN) IM(R6) IP(R6)
.END

```

\*\*\*\* 10/22/98 02:05:20 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA  
TRIFASICO.

\*\*\*\* SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
( 1 )	0.0000	( 2 )	0.0000	( 3 )	0.0000	( 4 )	0.0000
( 5 )	0.0000	( 6 )	0.0000	( 7 )	0.0000	( 8 )	0.0000
( 9 )	0.0000						

VOLTAGE SOURCE CURRENTS  
NAME CURRENT

VAN	0.000E+00
VBN	0.000E+00
VCN	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

\*\*\*\* 10/22/98 02:05:20 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA  
TRIFASICO.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

```
FREQ    VM(4,5)  VP(4,5)  IM(VAN) IP(VAN)  IM(R4)  IP(R4)
6.000E+01 1.765E+03 3.215E+01 3.708E+02 1.681E+02 2.141E+02 1.811E+01
```

\*\*\*\* 10/22/98 02:05:20 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA TRIFASICO.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

```
FREQ    VM(5,6)  VP(5,6)  IM(VBN) IP(VBN)  IM(R5)  IP(R5)
6.000E+01 1.765E+03 -8.785E+01 3.708E+02 4.811E+01 2.141E+02 -1.019E+02
```

\*\*\*\* 10/22/98 02:05:20 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DE VOLTAJES DE FASE Y CORRIENTE EN UN SISTEMA TRIFASICO.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

```
FREQ    VM(6,4)  VP(6,4)  IM(VCN) IP(VCN)  IM(R6)  IP(R6)
6.000E+01 1.765E+03 1.521E+02 3.708E+02 -7.189E+01 2.141E+02 -4.189E+01
```

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .11

Los resultados de esta simulación nos confirman que el circuito forma un conjunto balanceado de voltajes y corrientes, se sigue un procedimiento similar para sistemas con diferentes valores de carga para formar un conjunto desbalanceado.

A continuación simularemos con Spice un circuito con acoplamiento magnético tal como los transformadores, obteniendo su corriente de estado estable del secundario del circuito así como el voltaje [1].

Como los transformadores son dos subcircuitos eléctricamente aislados, y Spice no permite los nodos flotantes, se toma al igual que los ejemplos anteriores el nodo cero como nodo de referencia, conectando los extremos inferiores de los inductores entre sí. El rango del coeficiente de acoplamiento es por definición  $0 < k < 1$ , lo fijaremos en 0.99995 para formar la trayectoria cerrada. El resultado de Spice es el siguiente:

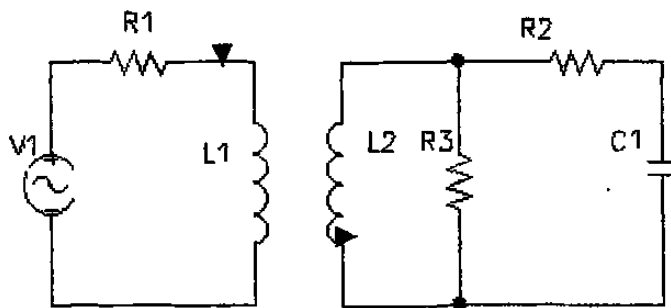


Fig. 2.17. Circuito con acoplamiento magnético.

```

**** 10/22/98 03:30:44 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
CALCULO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UN TRANSFORMADOR.
****  CIRCUIT DESCRIPTION
*****
*****
V1  1 0 AC 100 0
R1  1 2 1
LPRIM 2 0 4
LSEC  0 3 2
K LPRIM LSEC 0.9995
R2  3 0 1
R3  3 4 2
C1  4 0 0.5
.AC LIN 1 60 60
.PRINT AC V(LPRIM) V(LSEC) V(3,4) V(4) I(R1) I(R2) I(R3)
.END
**** 10/22/98 03:30:44 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
CALCULO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UN TRANSFORMADOR.

```

\*\*\*\* SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION    TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
( 1)	0.0000	( 2)	0.0000	( 3)	0.0000	( 4)	0.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS  
NAME      CURRENT

V1      0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

\*\*\*\* 10/22/98 03:30:44 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE UN TRANSFORMADOR.

\*\*\*\* AC ANALYSIS                      TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

FREQ	V(LPRIM)	V(LSEC)	V(3,4)	V(4)	I(R1)
6.000E+01	7.245E+01	3.394E+01	3.394E+01	9.002E-02	3.601E+01

I(R2)      I(R3)

3.394E+01    1.697E+01

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME      .11

Con Spice se pueden simular también circuitos activos tal como filtros, funciones de transferencias, gráficas de ganancia y de Bode, etc., simularemos un diseño de filtro activo y un circuito por medio de la gráfica de Bode y de la ganancia para comprobar si este dispositivo da paso a las altas frecuencias.

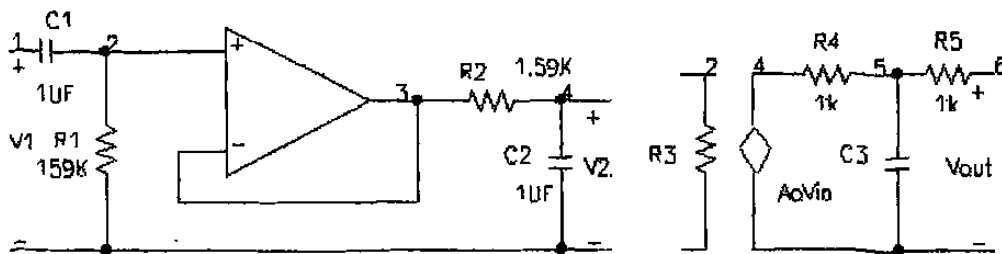


Fig. 2.18. Filtro pasabanda con su modelo de op amp dependiente de la frecuencia.

\*\*\*\* 10/22/98 04:07:34 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

DIAGRAMA DE BODE DE UN FILTRO ACTIVO PASABAJA.

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

V1 1 0 AC 1

C1 1 2 1UF

R1 2 0 159K

RI 2 3 100K

E 4 0 2 3 100K

RB 4 5 1

CB 5 0 0.1

R2 3 6 1.59K

C2 6 0 1UF

.AC DEC 10 .1 1K

.PLOT AC VDB(6)

.END

\*\*\*\* 10/22/98 04:07:34 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

DIAGRAMA DE BODE DE UN FILTRO ACTIVO PASABAJA.

\*\*\*\* SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
( 1)	0.0000	( 2)	0.0000	( 3)	0.0000	( 4)	0.0000
( 5)	0.0000	( 6)	0.0000				

#### VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
V1	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS

\*\*\*\* 10/22/98 04:07:34 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

DIAGRAMA DE BODE DE UN FILTRO ACTIVO PASABAJA.

\*\*\*\* AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

FREQ	VDB(6)
(*)-----	-6.0000E+01 -4.0000E+01 -2.0000E+01 -3.5527E-15 2.0000E+01

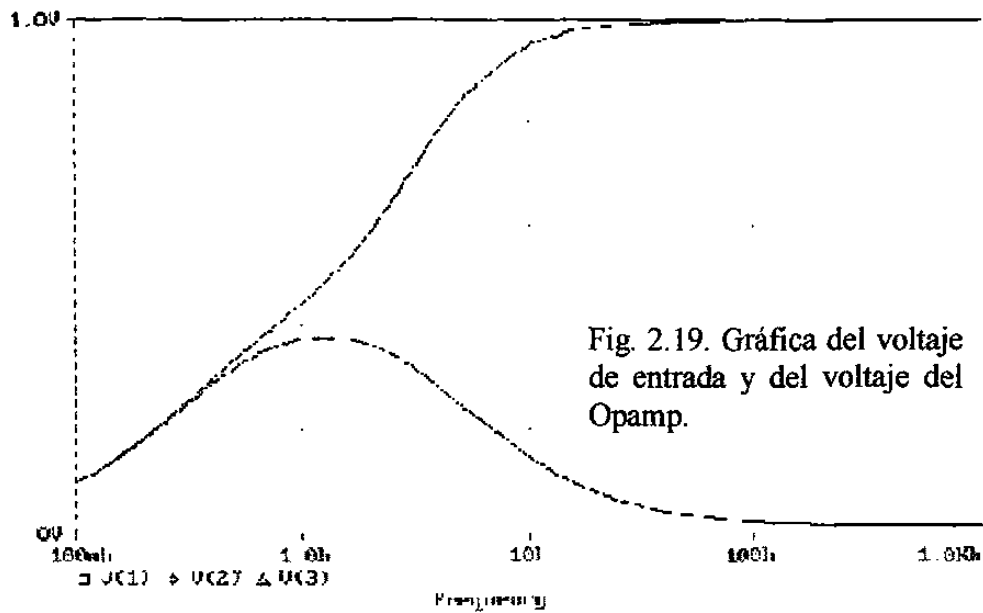
FREQ	VDB(6)
1.000E-01	-2.025E+01 . * . .
1.259E-01	-1.838E+01 . . * . .
1.585E-01	-1.659E+01 . . * . .
1.995E-01	-1.490E+01 . . * . .
2.512E-01	-1.334E+01 . . * . .
3.162E-01	-1.197E+01 . . * . .
3.981E-01	-1.082E+01 . . * . .
5.012E-01	-9.902E+00 . . * . .
6.310E-01	-9.225E+00 . . * . .
7.943E-01	-8.769E+00 . . * . .
1.000E+00	-8.510E+00 . . * . .
1.259E+00	-8.429E+00 . . * . .
1.585E+00	-8.518E+00 . . * . .

1.995E+00 -8.785E+00 .	.	.	*	.	.
2.512E+00 -9.251E+00 .	.	.	*	.	.
3.162E+00 -9.939E+00 .	.	.	*	.	.
3.981E+00 -1.087E+01 .	.	.	*	.	.
5.012E+00 -1.203E+01 .	.	.	*	.	.
6.310E+00 -1.341E+01 .	.	.	*	.	.
7.943E+00 -1.497E+01 .	.	.	*	.	.
1.000E+01 -1.667E+01 .	.	.	*	.	.
1.259E+01 -1.847E+01 .	.	.	*	.	.
1.585E+01 -2.034E+01 .	.	.	*	.	.
1.995E+01 -2.225E+01 .	.	.	*	.	.
2.512E+01 -2.420E+01 .	.	*	.	.	.
3.162E+01 -2.616E+01 .	.	*	.	.	.
3.981E+01 -2.814E+01 .	.	*	.	.	.
5.012E+01 -3.012E+01 .	.	*	.	.	.
6.310E+01 -3.212E+01 .	.	*	.	.	.
7.943E+01 -3.411E+01 .	.	*	.	.	.
1.000E+02 -3.611E+01 .	.	*	.	.	.
1.259E+02 -3.810E+01 .	.	*	.	.	.
1.585E+02 -4.010E+01 .	.	*	.	.	.
1.995E+02 -4.210E+01 .	.	*	.	.	.
2.512E+02 -4.410E+01 .	*	.	.	.	.
3.162E+02 -4.610E+01 .	*	.	.	.	.
3.981E+02 -4.810E+01 .	*	.	.	.	.
5.012E+02 -5.010E+01 .	*	.	.	.	.
6.310E+02 -5.210E+01 .	*	.	.	.	.
7.943E+02 -5.410E+01 .	*	.	.	.	.
1.000E+03 -5.610E+01 .	*	.	.	.	.

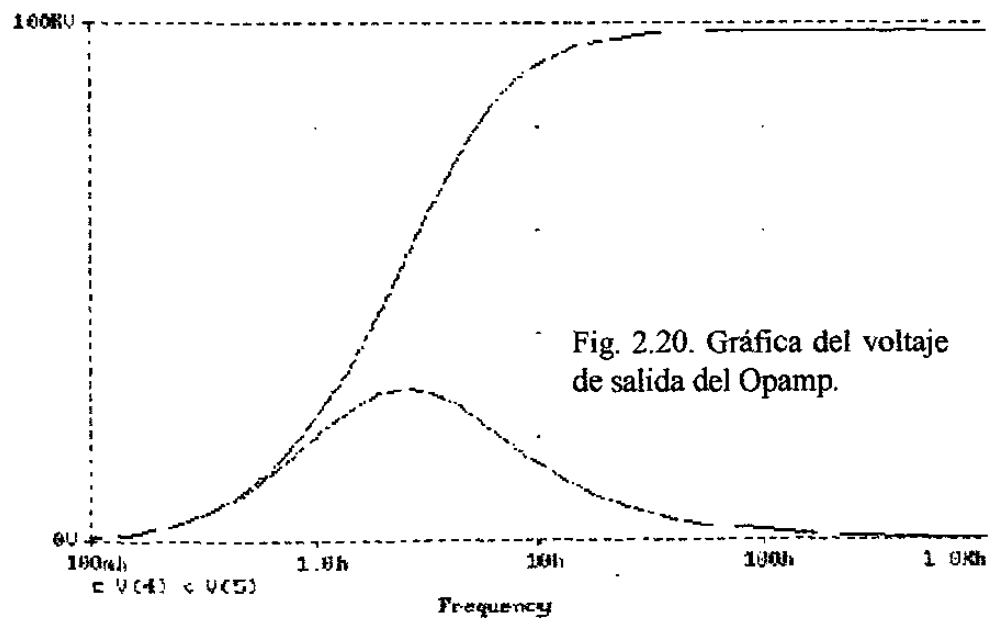
-----

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .49

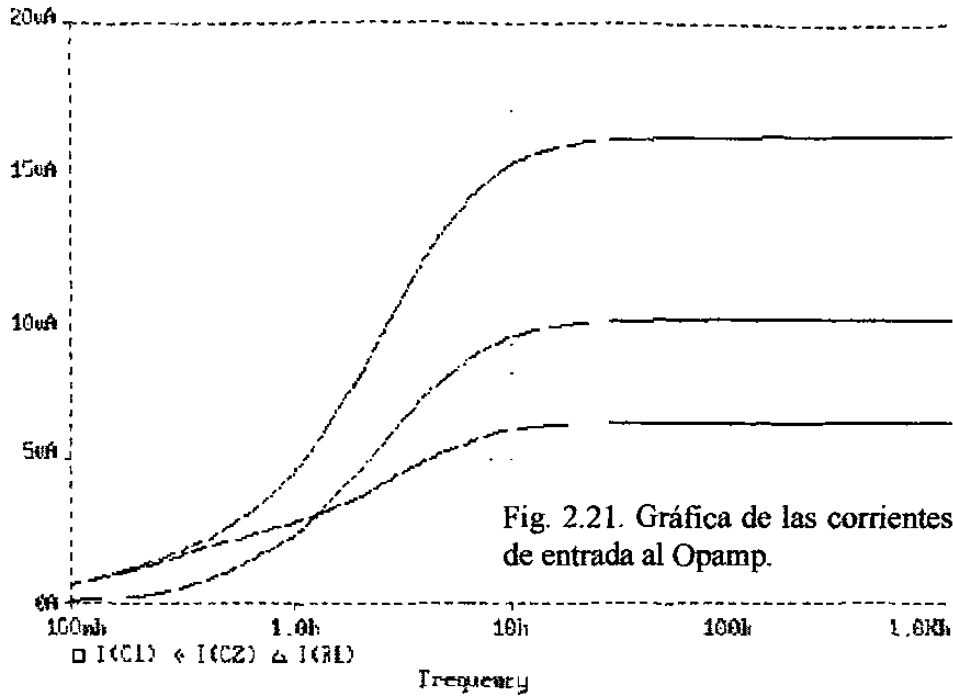


Exit **Trace** Remove\_trace X\_axis Y\_axis Plot\_control Display\_control



Exit **Trace** Remove\_trace X\_axis Y\_axis Plot\_control Display\_control





```
Exit Plot Remove_trace X_axis Y_axis Plot_control Display_control
facros Hard copy Cursor Zoom Label config colors
```

Con este problema finalizamos nuestra sección de estado estable utilizando el programa Pspice.

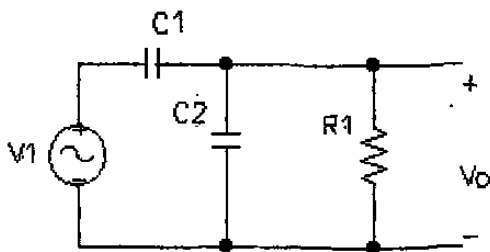


Fig. 2.22. Circuito para graficar el diagrama de Bode.

\*\*\*\* 10/28/98 23:52:17 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

GRAFICA DE BODE.

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

C1 1 2 0.5U

C2 2 0 0.5U

```

R1 2 0 10K
Vin 1 0 AC 1
.PROBE
.AC DEC 1000 1.0m 1.000k ; *ipsp*
.PLOT AC VDB(2)
.END
**** 10/28/98 23:52:17 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
GRAFICA DE BODE.
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
*****
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 0.0000 ( 2) 0.0000

VOLTAGE SOURCE CURRENTS
NAME CURRENT
Vin 0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 0.00E+00 WATTS
**** 10/28/98 23:52:17 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
GRAFICA DE BODE.
**** AC ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C
*****
*****
FREQ VDB(2)
(*)----- -1.5000E+02 -1.0000E+02 -5.0000E+01 -7.1054E-15 5.0000E+01

```

En la gráfica se verifica que a frecuencias altas deja pasar la mayor cantidad de señal, por lo tanto se puede decir que es un circuito pasa alta.

200dB

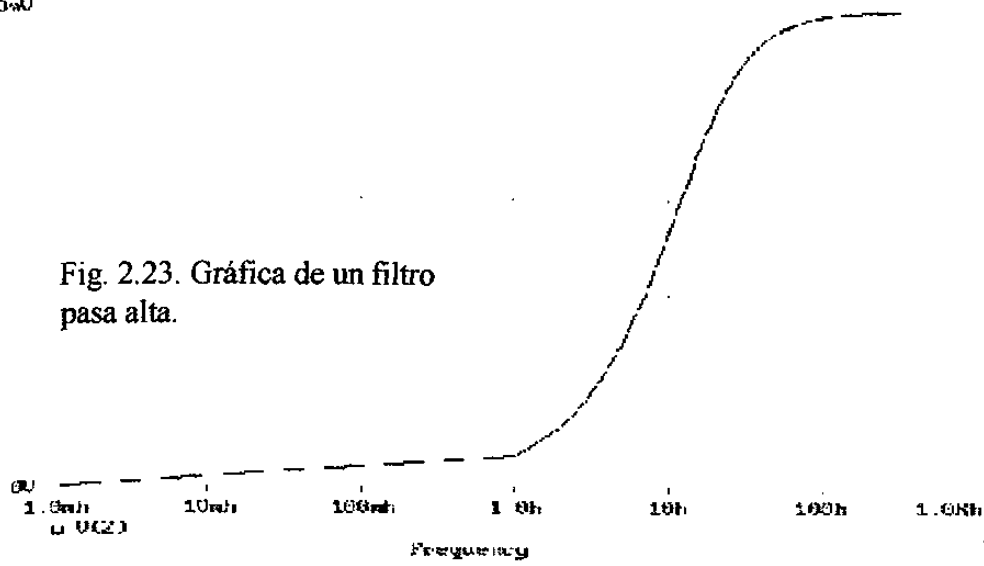


Fig. 2.23. Gráfica de un filtro  
pasa alta.

Exit: **Ctrl+Z** Remove Legend X axis Y axis Plot content Display content  
 Backs Hard Copy Cursor Zoom Label config\_colours

## CAPÍTULO 3

# ANÁLISIS DE CIRCUITOS TRANSITORIOS.

### 3.1. - EL CIRCUITO RLC COMO DE SEGUNDO ORDEN.

El análisis de un circuito RLC nos proporciona una ecuación integro diferencial que, al derivar uno de los componentes de voltaje o corriente nos proporciona un circuito de segundo orden. En éste tipo de circuito se tiene dos tipos de componentes que son las respuestas del circuito, estas componentes son: la respuesta natural y la respuesta forzada, que en el aspecto matemático se conocen como la parte homogénea (la respuesta natural) y la parte no homogénea (la respuesta forzada). Por ejemplo, consideremos el circuito serie de la Fig. 3.1, cuya onda de estado estable se observa en la Fig.3.2d, y supongamos que no tenemos condiciones iniciales en el circuito, por LVK tenemos [1], [2], [3], [12]:

$$Ri + Ldi/dt + (1/C)\int i(t)dt = \text{sen}(\omega t) \quad (3.1)$$

Al diferenciar la ecuación descriptiva para  $i(t)$  tenemos:

$$Ld^2i/dt^2 + Rdi/dt + (1/C)i = \omega \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

en la cual podemos hacer que:

$$d^2i/dt^2 + (R/L)di/dt + (1/LC)i = (\omega/L)\cos(\omega t) \quad (3.2A)$$

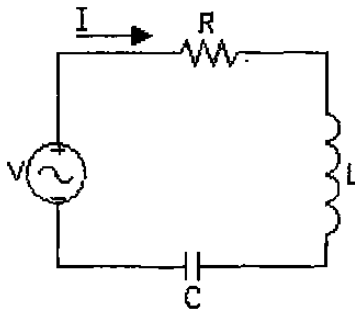


Fig. 3.1. - Circuito RLC de segundo orden.

cuya ecuación característica es:

$$S^2 + (R/L)S + (1/LC) = 0 \quad (3.3)$$

que nos lleva a una solución cuadrática de la ecuación, ésta solución es:

$$S_{1,2} = [-(R/L) \pm \sqrt{(R/L)^2 - 4(1/LC)}]/2 \quad (3.4)$$

en donde  $S_{1,2}$  son los exponentes característicos, podemos simplificar si hacemos de la Ec. 3.3:

$$S^2 + 2\zeta\omega_0 S + \omega_0^2 = 0 \quad (3.5)$$

en donde  $\omega_0$  se conoce como frecuencia natural no amortiguada y  $\zeta$  se conoce como proporción de amortiguación. Si sustituimos  $\omega_0^2 = a_0$  y  $2\zeta\omega_0 = a_1$ , la ecuación característica se transforma en:  $S^2 + a_1 S + a_0 = 0$ , en la cual  $a_1 = R/L$  y  $a_0 = 1/LC$ , por lo que al simplificar estas expresiones tenemos:  $\omega_0 = \sqrt{a_0} = 1/\sqrt{LC}$  y  $\zeta = a_1/2\omega_0 = R/2L\sqrt{LC}$ , sustituyendo estas expresiones tenemos la ecuación general:

$$S_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}) \omega_0 \quad (3.6)$$

dependiendo de los valores de los elementos, dados por  $\zeta$  podemos tener tres casos en la solución de éste tipo de circuito, estos casos son: sobreamortiguado, subamortiguado y críticamente amortiguado.

### 3.1.1. - CASO SOBREAMORTIGUADO ( $\zeta > 1$ ).

Para este caso, las raíces  $S_1$  y  $S_2$  son reales y distintas puesto que el discriminante  $\zeta^2-1$  es mayor que cero y cada  $S$  tienen una parte real dada por  $S_1 = \sigma_1$  y  $S_2 = \sigma_2$  y la respuesta natural está dada por la suma de dos exponenciales reales dadas por [1]:

$$i(t) = K_1 \exp(\sigma_1 t) + K_2 \exp(\sigma_2 t) \quad (3.7)$$

no es posible que ninguno de los exponentes característicos  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  sean positivos porque esto implica que crecerían en magnitud conforme  $t$  se hace mayor. Por lo tanto en el caso sobreamortiguado hay suficiente amortiguación para que cada término en la respuesta natural pierda constantemente amplitud, ya que la amortiguación es la pérdida gradual de la energía almacenada y por consiguiente la respuesta natural decae a cero, este caso se representa en la Fig. 3.2a.

### 3.1.2. - CASO SUBAMORTIGUADO ( $\zeta < 1$ ).

En éste caso, las raíces  $S_1$  y  $S_2$  complejas puesto que el discriminante  $\zeta^2-1$  es menor que cero y deben de ser raíces conjugadas complejas en donde las partes reales son iguales, y las partes imaginarias también lo son pero con los signos opuestos, entonces los exponenciales característicos están dados por  $S_1 = \sigma + j\omega$  y  $S_2 = \sigma - j\omega$  y la respuesta natural esta dada por [1]:

$$i(t) = \exp(\sigma t)[K_1 \sin(\omega t) + K_2 \cos(\omega t)] \quad (3.8)$$

en este caso consiste de dos términos que decaen constantemente, pero el decaimiento está modulado por oscilaciones sinusoidales de frecuencia  $\omega$  rad/seg, la amplitud de

estas oscilaciones decaen como  $\exp(\sigma t)$ , de forma que la proporción de amortiguación varía inversamente respecto a. Este caso lo representamos en la Fig. 3.2b

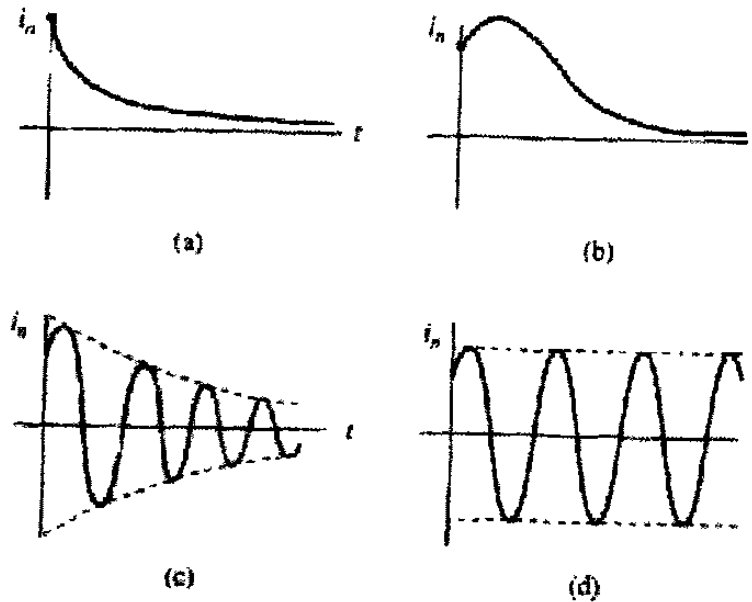


Fig. 3.2.- Gráficas de las respuestas de un circuito de segundo orden: (a) Sobreamortiguado; (b) Criticamente amortiguado; (c) Subamortiguado; (d) no amortiguado.

### 3.1.3. - CASO CRITICAMENTE AMORTIGUADO ( $\zeta = 1$ ).

El último caso que tenemos es en donde los exponentes característicos son reales e iguales, o sea,  $S_1 = S_2 = \sigma$ , y es la línea divisora entre los casos sobreamortiguado y subamortiguado, en este caso la forma general para la solución natural esta dada por [1]:

$$i(t) = K_1 \exp(\sigma t) + K_2 t \exp(\sigma t) \quad (3.9)$$

la solución natural consiste de la suma de un término exponencial y su forma  $t$  multiplicada asociada, tal como lo representa la Fig. 3.2c.

**TABLA 3.1. Soluciones para funciones forzadas comunes.**

Término forzado.	Solución forzada.
k	A
t	At + B
t <sup>2</sup>	At <sup>2</sup> + Bt + C
t <sup>n</sup>	At <sup>n</sup> + Bt <sup>(n-1)</sup> + ... + Ft + G
exp(σt)	A exp(σt)
exp(st)	A exp(st)
senωt, cosωt	Asenωt + Bcosωt
exp(σt)senωt, exp(σt)cosωt	Exp(σt)(A senωt + Bcosωt)
texp(σt) senωt, exp(σt)cosωt	texp(σt)(A senωt + Bcosωt) + exp(σt)(C senωt + Dcosωt)

### 3.1.4.- RESPUESTA FORZADA.

La respuesta forzada de un circuito de segundo orden debe de satisfacer la ecuación diferencial del tipo  $d^2x/dt^2 + a_1dx/dt + a_0x = f(t)$ , en la cual se requiere de una combinación lineal de  $f(t)$  y sus derivadas, en otras palabras, se requiere de que las diferenciaciones de la combinación lineal de  $f(t)$  y sus derivadas en el lado izquierdo puedan producir en las cancelaciones requeridas para dejar únicamente  $f(t)$ , que es lo que se requiere para satisfacer la ecuación. En la Tabla 1, [1] aparece una lista de las funciones forzadas  $f(t)$  más comunes, la forma general de las correspondientes respuestas forzadas está dada en la segunda columna.

Por último, la respuesta total de un circuito es la suma de sus respuestas natural y forzada, los voltajes capacitivos y/o corrientes inductivas iniciales para determinar las



condiciones iniciales requeridas pueden estar dadas, o puede ser necesario determinarlas, con el fin de encontrar los valores de las constantes.

### 3.2. - TRANSITORIO EN EL GENERADOR.

Cuando una máquina genera un voltaje senoidal, se conoce el hecho de que el valor de la corriente de corto circuito en el periodo transitorio dependerá parcialmente sobre el instante del ciclo a la cual ocurre el corto. El análisis matemáticos realiza cortocircuitando las terminales del generador, asumiendo que la falla es balanceada, tal como se observa en la Fig. 3.3, en el instante cero, con el generador inicialmente a circuito abierto. La ecuación de voltaje instantáneo para el circuito es [4], [5], [12]:

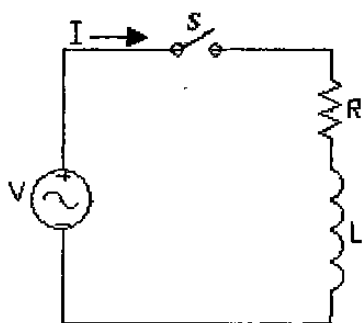


Fig. 3.3. Circuito RL para obtener la ecuación de la corriente instantánea.

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri &= E_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \\ &= E_{\max} (\sin \omega t \cos \alpha + \cos \omega t \sin \alpha) \end{aligned} \quad (3.10)$$

utilizando la transformación de Laplace (Tabla 2) [1] de ésta ecuación resulta:

$$(LS + R)I(s) = E_{\max} \left[ \cos \alpha \left( \frac{\omega}{S^2 + \omega^2} \right) + \sin \alpha \left( \frac{S}{S^2 + \omega^2} \right) \right] \quad (3.11)$$

despejando  $I(s)$  y sacando un factor común del denominador resulta:

$$I(s) = E_{\max} \left[ (\omega \cos \alpha + S \sin \alpha) / ((LS + R)(S^2 + \omega^2)) \right]$$

**TABLA 3.2. Propiedades de la transformada de Laplace.**

	F(t)	F(s)
1. Linealidad	$C1f_1(t) + c2f_2(t)$	$C1F_1(s) + c2F_2(s)$
2. Diferenciación	$(d/dt)f(t)$	$sF(s) - f(0^-)$
3. Diferenciación enésima	$(d^n/dt^n)f(t)$	$s^n F(s) - s^{n-1}f(0^-) - s^{n-2}f'(0^-) \dots - sf^{(n-2)}(0^-) - f^{(n-1)}(0^-)$
4. Integración	$\int f(t)dt$	$F(s)/s$
5. Desplazamiento de tiempo	$f(t - t_0)u(t - t_0)$	$e^{-st_0}F(s)$
6. Desplazamiento de la frecuencia	$e^{-st_0}f(t)$	$F(s + s_0)$
7. T multiplicación	$tf(t)$	$(-d/ds)F(s)$
8. T multiplicación enésima	$t^n f(t)$	$(-1)^n (d^n/ds^n)F(s)$

**TABLA 3.3. Transformada de Laplace.**

	F(t)	F(s)
Funciones ordinarias.		
1. Constante		$1/s$
2. t	t	$1/s^2$
3. Potencia de t	$t^{(n-1)}/(n-1)!$	$1/s^n$
4. Exponencial	$\text{Exp}(-at)$	$1/(s + a)$
5. Exponencial multiplicada	$T\text{exp}(-at)$	$1/(s + a)^2$
6. Exponencial con t multiplicación repetida	$(1/(n-1)!) t^{(n-1)}\text{exp}(-at)$	$1/(s + a)^n$
7. Seno	$\text{sen}\omega t$	$\omega/(s^2 + \omega^2)$
8. Coseno	$\text{cos}\omega t$	$s/(s^2 + \omega^2)$
9. Sinusoide	$(c^2 + d^2)^{1/2}\text{cos}(\omega t - \text{Atan}(d/c))$	$(cs + d\omega)/(s^2 + \omega^2)$
10. Seno amortiguado	$\text{exp}(-at)\text{sen}\omega t$	$\omega/((s+a)^2 + \omega^2)$
11. Coseno amortiguado	$\text{exp}(-at)\text{cos}\omega t$	$(s+a)/((s+a)^2 + \omega^2)$
12. Sinusoide amortiguada	$(c^2 + d^2)^{1/2}\text{exp}(-at)\text{cos}(\omega t - \text{Atan}(d/c))$	$(c(s+a) + d\omega)/\omega/((s+a)^2 + \omega^2)$
13. Seno t multiplicado		

14. Coseno t multiplicado	t sen $\omega$ t	$2\omega s/(s^2 + \omega^2)^2$
	t cos $\omega$ t	$(s^2 - \omega^2)/(s^2 + \omega^2)^2$

multiplicando por la unidad (L/L) y simplificando términos por medio de fracciones parciales [12]

$$I(s) = (E_{max}/L)[(AS + B)/(S^2 + \omega^2) + C/(S + R/L)] \quad (3.12)$$

La fracción parcial de la transformada de Laplace que se muestra en la Ec. 3.12, nos es conveniente para obtener el tiempo de solución de la tabla 3. Las constantes A; B y, C se obtienen fácilmente verificando el hecho de que  $(S^2 + \omega^2) = (S + j\omega)(S - j\omega)$ , el cual nos manda al plano complejo, por lo tanto si hacemos que:

$$F(S) = (\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((LS + R)(S^2 + \omega^2)) = (AS + B)/(S^2 + \omega^2) + C/(S + R/L) = (AS + B)/(S + j\omega) + (AS + B)^*/(S - j\omega) + C/(S + R/L)$$

$$(S + j\omega)F(S) = (AS + B) + (S + j\omega)(AS + B)^*/(S - j\omega) + C(S + j\omega)/(S + R/L) = (S + j\omega)(\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((S + R/L)(S + j\omega)(S - j\omega))$$

Si  $S = -j\omega$ , tenemos que:

$$-j\omega A + B = (\omega \cos\alpha - j\omega \sin\alpha)/((-j\omega + R/L)(-2j\omega)) \quad (3.13)$$

$$(S - j\omega)F(S) = (S - j\omega)(AS + B)/(S + j\omega) + (AS + B)^* + C(S - j\omega)/(S + R/L) = (S - j\omega)(\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((S + R/L)(S + j\omega)(S - j\omega))$$

Si  $S = j\omega$ , tenemos que:

$$j\omega A + B = (\omega \cos\alpha + j\omega \sin\alpha)/((j\omega + R/L)(2j\omega)) \quad (3.14)$$

$$(S + R/L)F(S) = (S + R/L)(AS + B)/(S + j\omega) + (S + R/L)(AS + B)^*/(S - j\omega) + C = (S + R/L)(\omega \cos\alpha + S \sin\alpha)/((S + R/L)(S + j\omega)(S - j\omega))$$

Si  $S = -R/L$ , tenemos que:

$$C = (\omega \cos \alpha + (-R/L) \operatorname{sen} \alpha) / ((-R/L + j\omega)(-R/L - j\omega)) \quad (3.15)$$

sumando las Ec's. 3.13 y 3.14, obtenemos el valor de B, al simplificar los términos:

$$\begin{aligned} 2B &= (\omega \cos \alpha - j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((-j\omega + R/L)(-2j\omega)) + (\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((j\omega + R/L)(2j\omega)) \\ 2B &= [(j\omega + R/L)(\omega \cos \alpha - j\omega \operatorname{sen} \alpha) + (j\omega - R/L)(\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha)] / [(2j\omega)(j\omega + R/L)(j\omega - R/L)] \\ 2B &= j2[\omega L \cos \alpha - R \operatorname{sen} \alpha] / [-2j(R^2 + \omega^2 L^2)] = L(R \operatorname{sen} \alpha - \omega L \cos \alpha) / (R^2 + \omega^2 L^2) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Los valores de resistencia y de inductancia se pueden obtener de la siguiente relación:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \\ R &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \theta \\ \omega L &= \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \theta \\ \theta &= \operatorname{Arc} \tan (\omega L / R) \end{aligned}$$

Por lo que al sustituir en la Ec. 3.16 resulta:

$$\begin{aligned} B &= [L / 2(R^2 + \omega^2 L^2)] (\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \alpha \cos \theta - \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \alpha \operatorname{sen} \theta) \\ B &= L \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z \end{aligned} \quad (3.17)$$

De manera similar se encuentra la constante A, multiplicando por (-1) la Ec. 3.13 y sumándole la 3.14

$$\begin{aligned} j2\omega A &= (-\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((-j\omega + R/L)(-2j\omega)) + (\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) / ((j\omega + R/L)(2j\omega)) \\ j2\omega A &= [(j\omega + R/L)(-\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha) + (j\omega - R/L)(\omega \cos \alpha + j\omega \operatorname{sen} \alpha)] / [2j\omega(j\omega + R/L)(j\omega - R/L)] \\ j2\omega A &= (\omega L / j\omega) [(R \cos \alpha + \omega L \operatorname{sen} \alpha)] / [-(R^2 + \omega^2 L^2)] \end{aligned}$$

sustituyendo los valores del plano complejo tenemos:

$$A = (\omega L / j^2 \omega^2) [ \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \alpha \cos \theta + \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \theta ] / [ -(R^2 + \omega^2 L^2) ]$$

$$A = \omega L \cos(\alpha - \theta) / Z \quad (3.18)$$

Y para el valor de la constante **C**, la obtenemos simplificando los términos:

$$C = [L / (R^2 + \omega^2 L^2)] [ - (R \operatorname{sen} \alpha - \omega L \cos \alpha) ]$$

$$C = [L / (R^2 + \omega^2 L^2)] [ - (\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \operatorname{sen} \alpha \cos \theta - \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \cos \alpha \operatorname{sen} \theta) ]$$

$$C = -L \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z \quad (3.19)$$

(Tomando en cuenta que la transformada es la suma de un número complejo y su conjugado, tenemos para  $f(t) = 2\operatorname{Re}[AS + B] \exp(\beta t) \exp[j(\alpha - \theta)]$ ). Sustituyendo A, B y C en la Ec. 3.12

$$I(s) = (E_{\max} / L) [ (SL \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z) / (S^2 + \omega^2) + (\omega L \cos(\alpha - \theta) / Z) / (S^2 + \omega^2) - L \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / Z / (S + R/L) ]$$

$$I(s) = (E_{\max} / Z) [ \operatorname{sen}(\alpha - \theta) (S / (S^2 + \omega^2) + \cos(\alpha - \theta) (\omega / (S^2 + \omega^2) - \operatorname{sen}(\alpha - \theta) / (S + R/L)) ]$$

Por medio de la tabla 2, obtenemos la transformada inversa de la solución, la cual es:

$$i(t) = (E_{\max} / Z) [ \operatorname{sen}(\alpha - \theta) \cos \omega t + \cos(\alpha - \theta) \operatorname{sen} \omega t - \operatorname{sen}(\alpha - \theta) \exp(-Rt/L) ]$$

en la que tenemos la forma simplificada

$$I(t) = (E_{\max} / Z) [ \operatorname{sen}(\omega t + \alpha - \theta) - \operatorname{sen}(\alpha - \theta) \exp(-Rt/L) ] \quad (3.20)$$

El primer término de la Ec. 3.20 varía senoidalmente con el tiempo, el segundo término es aperiódico y decae exponencialmente con una constante de tiempo  $L/R$ , a éste término se le llama componente de CD de la corriente. El estado de la corriente

transitoria dependerá algo sobre el ángulo  $\alpha$  de la onda del voltaje en el instante  $t = 0$  del corto circuito. Supongamos que en  $t = 0$ , el ángulo  $(\alpha - \theta) = -90^\circ$ , la onda de corriente tendrá una componente CD inicial máxima que es igual al máximo valor senoidal. Si, sin embargo,  $\alpha = \theta$  en  $t = 0$ , entonces la componente CD de la corriente no existe. Esto se observa en la Fig. 3.4. Sin embargo, la componente CD puede tener cualquier valor y depende del instante en que el interruptor se cierra. El factor a la cual varia está entre 1.0 y 1.6, dependiendo del tipo de interruptor y su velocidad de operación [4], [5].

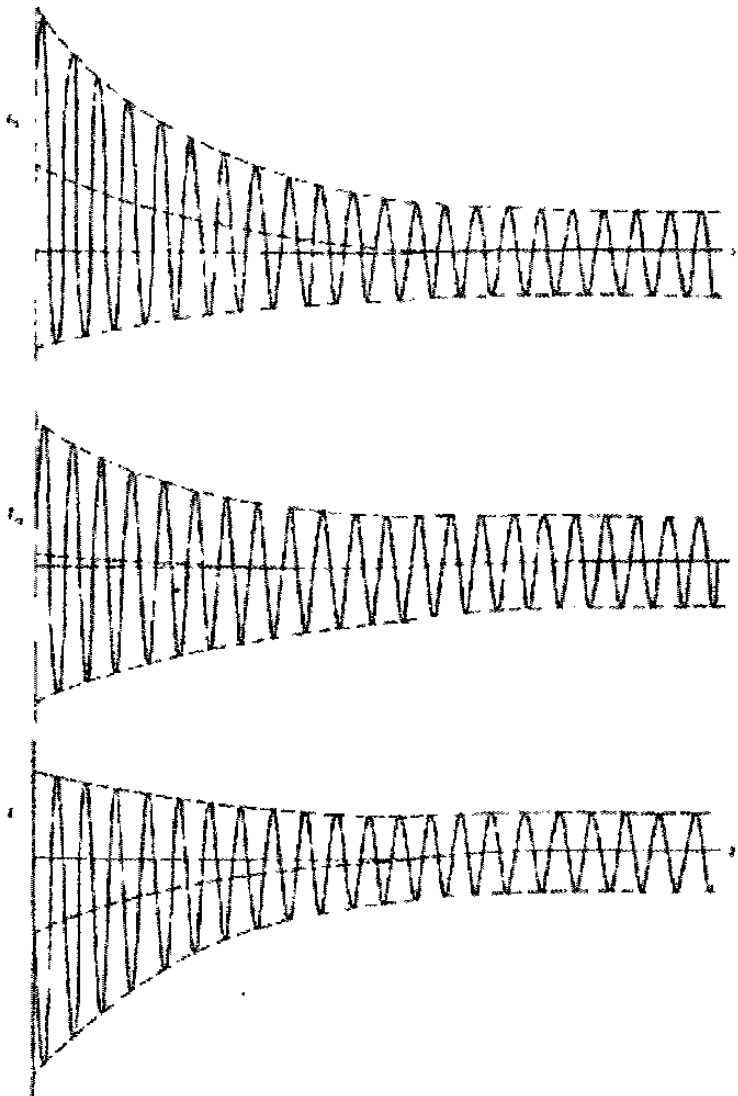


Fig. 3.4. Gráfica de la componente transitoria de la corriente como una función del tiempo.

### 3.3. SIMULACIÓN DE ESTADO TRANSITORIO DE UN CIRCUITO RLC.

A continuación analizaremos un circuito RL para un análisis transitorio, dado el circuito de la Fig. 3.5. Para este tipo de análisis efectuaremos dos corridas del circuito, en la primera corrida pondremos una fuente de corriente inactiva en el lugar de la inductancia (Fig. 3.5b), que se coloca en corto circuito para que podamos imprimir la corriente que se almacena  $I_L = I(VD)$ , y en la segunda corrida calcularemos el transitorio  $I(L1)$  (Fig. 3.5a) [1].

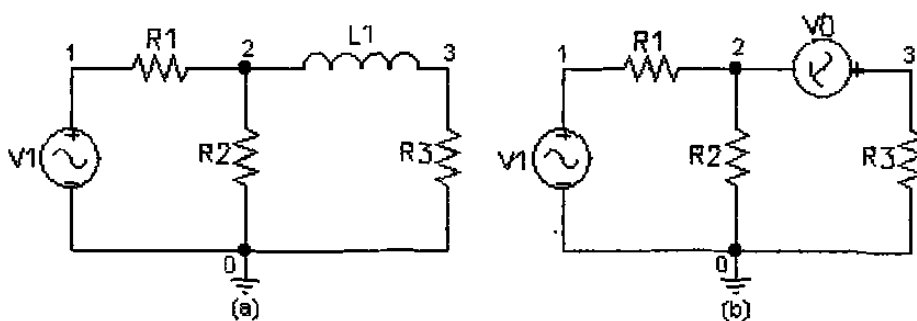


Fig. 3.5. (a) Circuito para el análisis transitorio; (b) Circuito auxiliar.

\*\*\*\* 10/20/98 02:02:18 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

DETERMINACION DE IC, DEL CIRCUITO AUXILIAR.

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

V1 1 0 DC 120

R1 1 2 8

R2 2 0 5

VD 2 3 DC 0

R3 3 0 6

.PRINT DC I(VD)

.END

\*\*\*\* 10/20/98 02:02:18 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

## DETERMINACION DE IC, DEL CIRCUITO AUXILIAR.

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION TEMPERATURE = 27.000 DEG C
```

```
*****
*****
```

```
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 120.0000 ( 2) 30.5080 ( 3) 30.5080
```

## VOLTAGE SOURCE CURRENTS

```
NAME CURRENT
```

```
V1 -1.119E+01
```

```
VD 5.085E+00
```

```
TOTAL POWER DISSIPATION 1.34E+03 WATTS
```

```
JOB CONCLUDED
```

```
TOTAL JOB TIME .33
```

Por lo tanto, la corriente inicial es  $IL(0^-) = IL(0^+) = 5.085$  Amp. Para  $t > 0$  el circuito está libre de fuentes (suponemos que  $V1 = 0$ ), y el archivo para la entrada Spice para graficar  $IL(t)$  para  $t \geq 0$  se pueden dar los resultados en dos gráficas diferentes, una que se proporciona con el comando BROWSE OUTPUT, y la otra por el comando PLOT de Spice (Fig. 3.6), se proporcionan ambas gráficas para que su análisis sea más conciso, a la salida del archivo BROWSE OUTPUT, observamos que la corriente  $IL$  decae exponencialmente de su valor inicial de 5.085 Ampere en  $t = 0$  hasta aproximadamente cero a los 14 mili segundos. Si queremos determinar la constante de tiempo  $\tau$ , la respuesta decae en  $(1/e) \cdot 5.085$ , examinando la figura esto ocurre a los 1.8706 ms.

```
**** 10/20/98 03:04:01 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
```

## CALCULO DEL TRANSITORIO DEL CIRCUITO RL.

```
**** CIRCUIT DESCRIPTION
```

```
*****
*****
```



\*LA DECLARACION DE V1 PUEDE OMITIRSE

V1 1 0 DC 0

R1 1 2 8

R2 2 0 5

R3 3 0 6

L1 2 3 30M IC=5.085

.TRAN 0.001 0.020 UIC

.PLOT TRAN I(L1)

.END

\*\*\*\* 10/20/98 03:04:01 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CALCULO DEL TRANSITORIO DEL CIRCUITO RL.

\*\*\*\* TRANSIENT ANALYSIS TEMPERATURE = 27.000 DEG C

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

TIME I(L1)

(\*)----- 0.0000E+00 2.0000E+00 4.0000E+00 6.0000E+00 8.0000E+00

-----

0.000E+00	5.085E+00	.	.	*	.	.
1.000E-03	3.761E+00	.	.	*	.	.
2.000E-03	2.779E+00	.	*	.	.	.
3.000E-03	2.052E+00	.	*	.	.	.
4.000E-03	1.516E+00	.	*	.	.	.
5.000E-03	1.120E+00	.	*	.	.	.
6.000E-03	8.272E-01	.	*	.	.	.
7.000E-03	6.109E-01	.	*	.	.	.
8.000E-03	4.513E-01	.	*	.	.	.
9.000E-03	3.333E-01	.	*	.	.	.
1.000E-02	2.463E-01	.	*	.	.	.
1.100E-02	1.818E-01	.	*	.	.	.
1.200E-02	1.344E-01	.	*	.	.	.

```

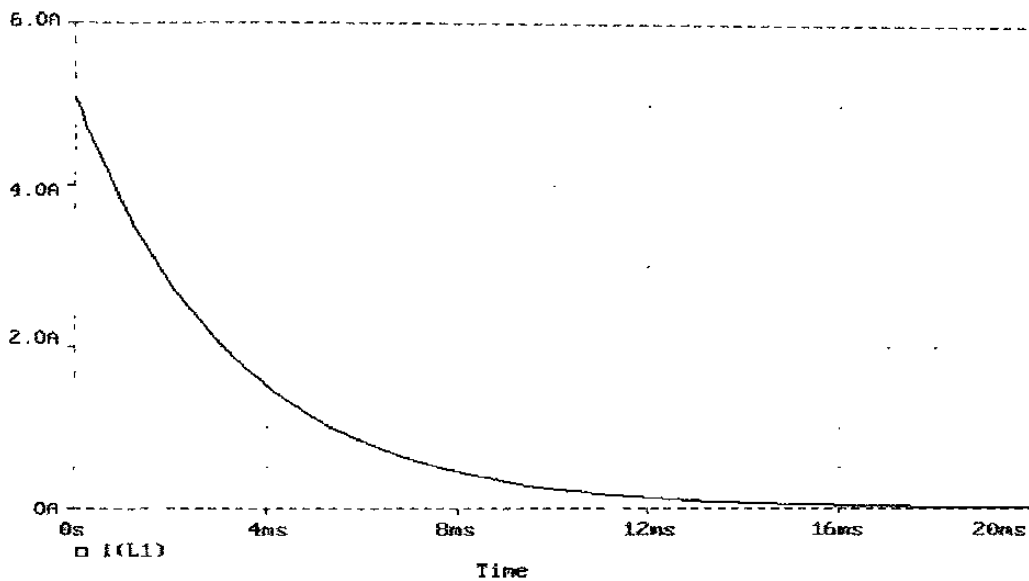
1.300E-02 9.921E-02 *
1.400E-02 7.330E-02 *
1.500E-02 5.413E-02 *
1.600E-02 4.000E-02 *
1.700E-02 2.953E-02 *
1.800E-02 2.182E-02 *
1.900E-02 1.611E-02 *
2.000E-02 1.189E-02 *

```

-----

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .28



```

Exit Add_trace Remove_trace X_axis Y_axis Plot_control Display_control
Macros Hard_copy Cursor Zoom Label config_colors

```

Fig. 3.6 Gráfica de  $I(L)$  para  $t > 0$ , de la Fig. 3.5.

Para un circuito RC se sigue un procedimiento semejante al anterior, pero con la diferencia de que el valor de  $V(0^-) = V(0^+)$ , y es el valor que se pondrá en la declaración de .IC.

Ahora analizaremos un circuito RLC dado por la Fig. 3.7, queremos encontrar el efecto de variación de R sobre una respuesta natural de un circuito RLC [5], el archivo Spice y su respectiva solución, así como la gráfica se dan a continuación:

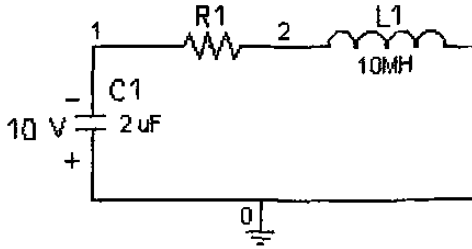


Fig. 3.7. Circuito serie RLC para el análisis de la variación de la resistencia.

\*\*\*\* 10/21/98 04:35:09 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UNA RESPUESTA NATURAL RLC

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

C1 1 0 2E-6

L1 2 0 10E-3 IC=-90E-3

R1 1 2 RMOD 1

.IC V(1)=-10

.MODEL RMOD RES(R=1)

.STEP LIN RES RMOD(R) 20,100,20

.TRAN 20E-6 2000E-6 UIC

.PROBE

.END

\*\*\*\* 10/21/98 04:35:09 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UNA RESPUESTA NATURAL RLC

\*\*\*\* Resistor MODEL PARAMETERS

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

RMOD

R 1

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME 1.15

En este ejemplo, definimos a la resistencia utilizando la declaración .MODEL, esta declaración incluye al parámetro RES el cual es fijado por medio de valores de interés utilizando la declaración de control .STEP. De esta manera Spice analiza al circuito serie RLC en varios tiempos para cada valor de resistencia, tal como se observa en el circuito de la Fig. 3.9. En esta figura se muestra el dibujo del voltaje del capacitor [1] contra el tiempo. También se puede analizar los demás parámetros del circuito si se hubiesen pedido en el análisis.

```

List of analysis sections for transient analysis
EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UN      Step RMOD R = 20      27.0 Deg
EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UN      Step RMOD R = 40      27.0 Deg
EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UN      Step RMOD R = 60      27.0 Deg
EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UN      Step RMOD R = 80      27.0 Deg
EFFECTO DE LA VARIACION DE R SOBRE UN      Step RMOD R = 100     27.0 Deg
  
```

Exit **All Transient Analysis** Select sections

Fig. 3.8. Pantalla en donde se nos presenta una lista de la variación de R para el análisis transitorio.

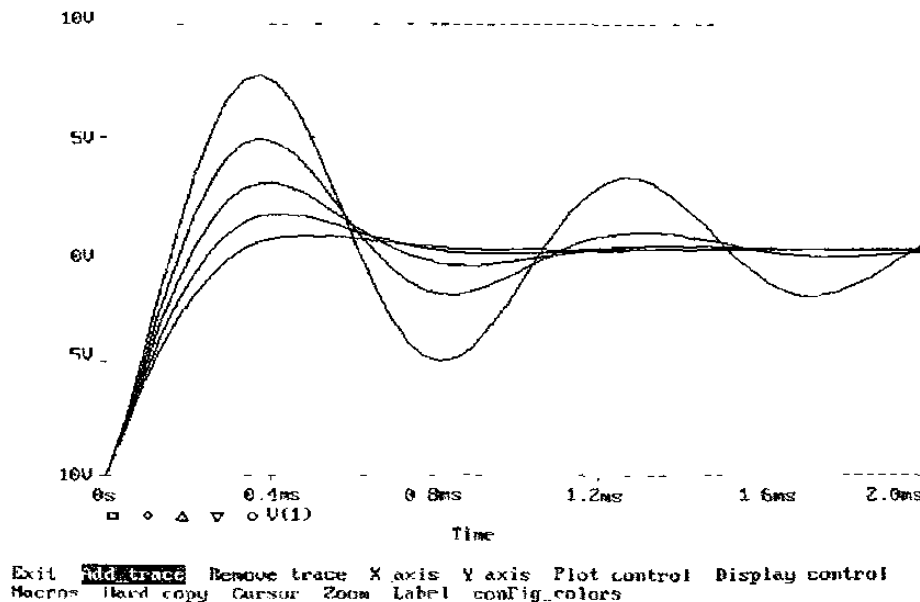


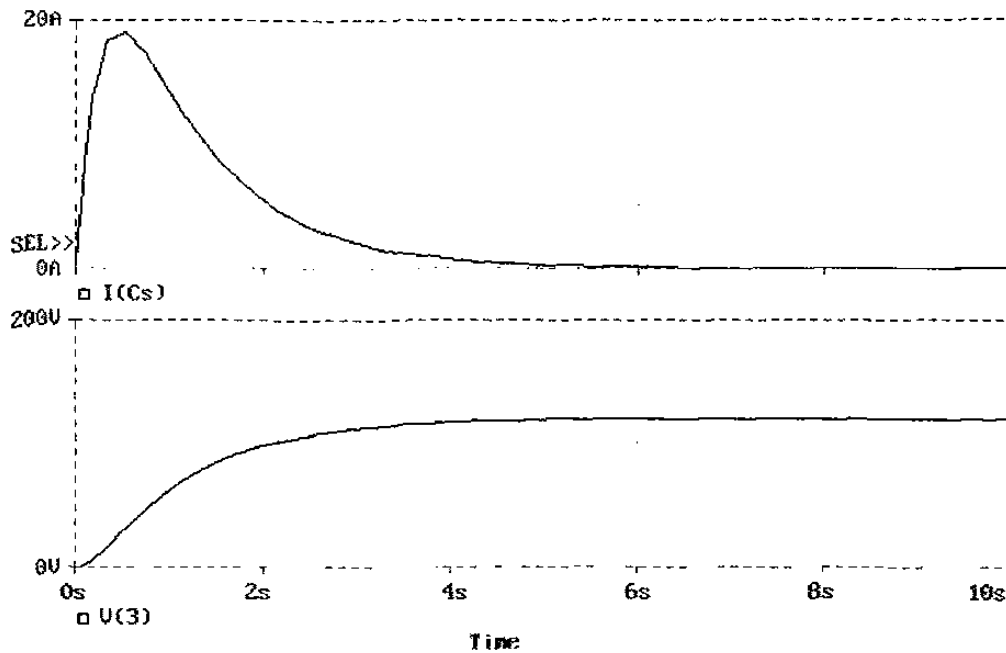
Fig. 3.9. Gráfica de la variación de R en un circuito RLC.

Continuando con nuestro análisis transitorio, del circuito de la Fig. 3.1 analizaremos los tres casos cambiando el valor de la resistencia [1], para efecto del ejemplo se utilizaron grandes valores de inductancia y capacitancia, los valores son los siguientes:  $L = 1\text{H}$ ,  $C = 0.25\text{F}$  y  $R = 5, 2$  y  $4$  Ohms, para los tres casos  $\omega_0 = 2$  rad/seg, para la proporción amortiguación tenemos que en el caso sobreamortiguado  $\xi = 5/4 > 1$ , cuyas raíces son  $s_1 = -4$  y  $s_2 = -1$ , con respuesta de  $i(t) = K_1 e^{-t} + K_2 e^{-4t}$ ; para el caso subamortiguado tenemos que  $\xi < 1$ , cuyas raíces son  $s_1 = -1 + j\sqrt{3}$  y  $s_2 = -1 - j\sqrt{3}$ , con respuesta de  $i(t) = e^{-t}(K_1 \cos\sqrt{3} t + K_2 \text{sen}\sqrt{3} t)$ ; y para el caso críticamente amortiguado  $\xi = 1$ , cuyas raíces son  $s_1 = -2$  y  $s_2 = -2$ , con respuesta de  $i(t) = K_1 e^{-2t} + K_2 t e^{-2t}$ ; las gráficas por medio de Spice para el voltaje y la corriente en el punto 3 en el punto 3 nos da:

```

****  CIRCUIT DESCRIPTION
*****
*****
**** 10/26/98 04:59:13 ***** Evaluation PSpice (September 1991) *****
CASO SOBREAMORTIGUADO
Vg 1 0 DC 120
*Rs = 5 OHMS (SOBREAMORTIGUADO), 2 OHMS (SUBAMORTIGUADO),
*4 OHMS (CRITICAMENTE AMORTIGUADO)
Rs 1 2 5
Ls 2 3 1 IC=0
Cs 3 0 0.25 IC=0
.TRAN 1 10 UIC
.PROBE
.END
      JOB CONCLUDED
TOTAL JOB TIME      .55

```



Exit **add\_trace** Remove\_trace X\_axis Y\_axis Plot\_control Display\_control  
 Macros Hard\_copy Cursor Zoom Label config\_colors

Fig. 3.10. Gráfica del voltaje y la corriente en el capacitor para el caso sobreamortiguado.

\*\*\*\* 10/26/98 04:59:13 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CASO SUBAMORTIGUADO

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

Vg 1 0 DC 120

\*Rs = 5 OHMS (SOBREAMORTIGUADO), 2 OHMS (SUBAMORTIGUADO),

\*4 OHMS (CRITICAMENTE AMORTIGUADO)

Rs 1 2 2

Ls 2 3 1 IC=0

Cs 3 0 0.25 IC=0

.TRAN 1 10 UIC

.PROBE

.END

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .55

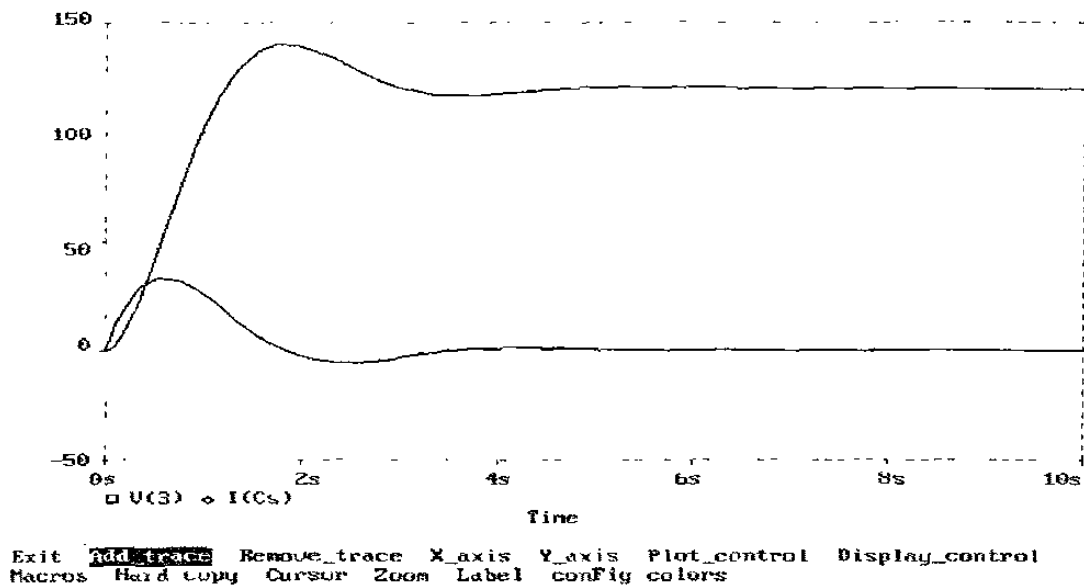


Fig. 3.11. Gráfica del voltaje y la corriente en el capacitor para el caso subamortiguado.

Si variamos el valor de la resistencia a  $0.25\Omega$ , en la gráfica se aprecia más el amortiguamiento de la onda, tal como se observa en la Fig. 3.12.

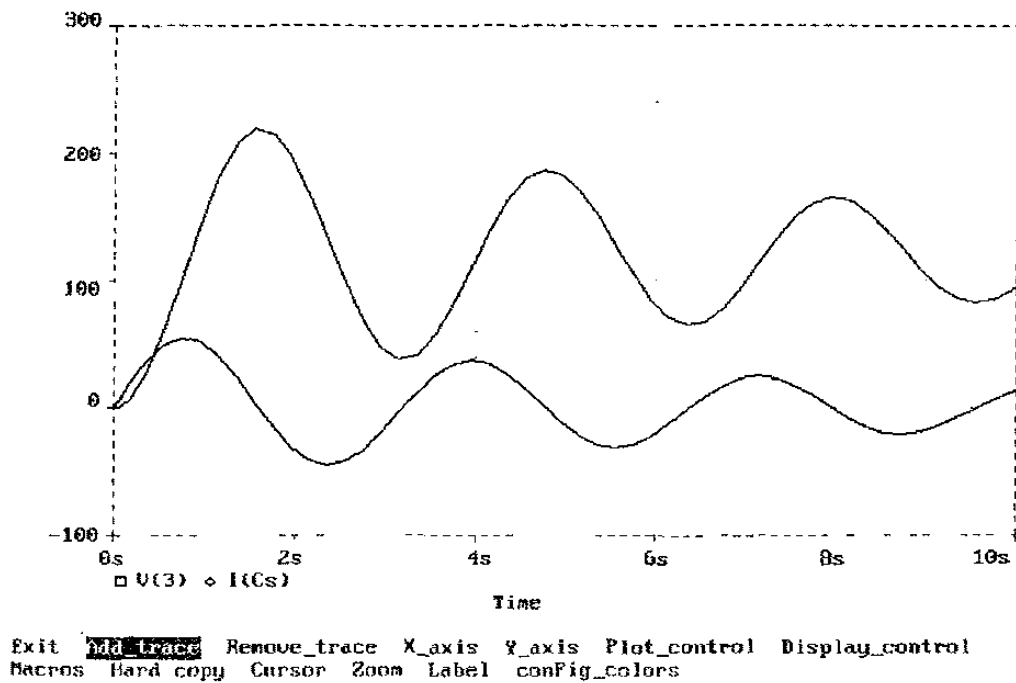


Fig. 3.12. Gráfica del voltaje y de la corriente en el capacitor para el caso subamortiguado con  $R=0.25\Omega$ .

\*\*\*\* 10/26/98 04:59:13 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

CASO CRITICAMENTE AMORTIGUADO

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

Vg 1 0 DC 120

\*Rs = 5 OHMS (SOBREAMORTIGUADO), 2 OHMS (SUBAMORTIGUADO),

\*4 OHMS (CRITICAMENTE AMORTIGUADO)

Rs 1 2 4

Ls 2 3 1 IC=0

Cs 3 0 0.25 IC=0

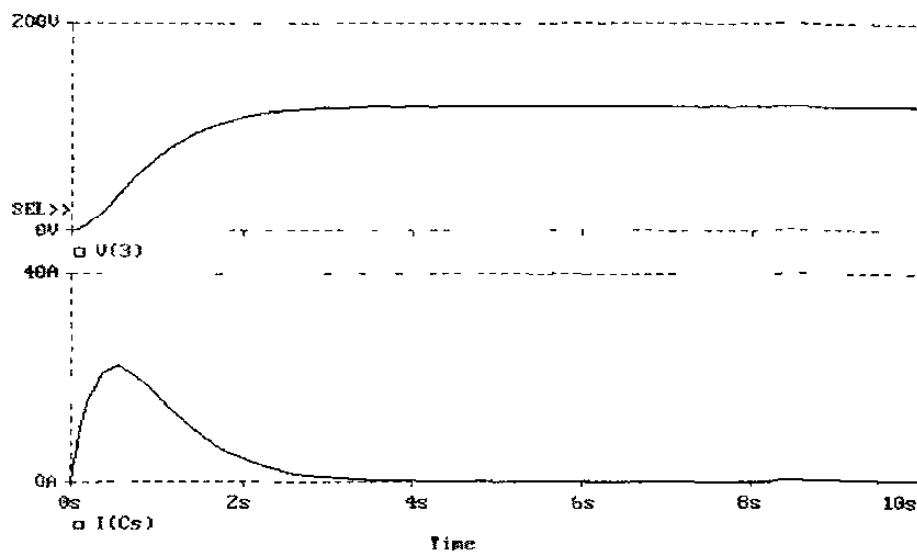
.TRAN 1 10 UIC

.PROBE

.END

JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME .55



Exit add\_trace Remove trace X\_axis Y\_axis Plot control Display control  
Macros Hard\_Copy Cursor Zoom Label conFig\_colors

Fig. 3.13. Gráfica del voltaje y la corriente en el capacitor para el caso críticamente amortiguado.



Continuando con nuestro análisis transitorio en Spice, codificaremos un circuito con la función .FOUR, la cual nos hará un análisis de Fourier, el circuito electrónico que simularemos se representa en la gráfica de la Fig. 3.14 [8], con los siguientes datos: considerar un arreglo mosfet de canal inducido, usar  $V_{to} = 1V$  y  $K = 100\mu A/vé2$ , con una entrada senoidal de 5v pico y a una frecuencia de 10KHz, nos piden encontrar el valor pico de salida esperado, para que fracción del periodo de la onda senoidal sobrepasa la salida, y, para que valor de la resistencia R1 la salida será la mitad de la entrada. Los resultados nos conducen a:

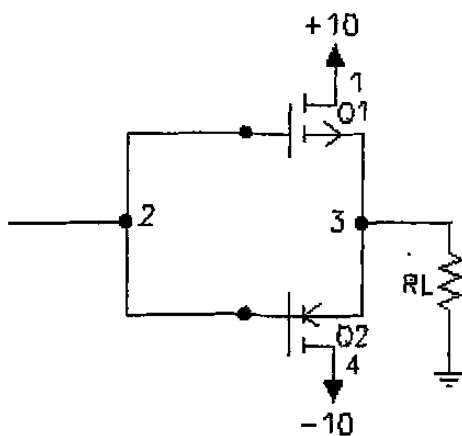


Fig. 3.14. Diagrama de un mosfet de canal inducido.

\*\*\*\* 10/27/98 04:36:28 \*\*\*\*\* Evaluation PSpice (September 1991) \*\*\*\*\*

ARREGLO DE MOSFET DE CANAL INDUCIDO.

\*\*\*\* CIRCUIT DESCRIPTION

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

M1 1 2 3 3 JUL

M2 4 2 3 3 JUL1

.MODEL JUL NMOS(Vto=1 Kp=200U)

.MODEL JUL1 PMOS(Vto=-1 Kp=200U)

V1 1 0 10

V2 4 0 -10

RL 3 0 1000MEG

Vin 2 0 SIN(0,5,10KHz)

.OP

```
.PROBE
.TRAN 10U 8M 0 1U
.FOUR 10KHz V(3)
.OPT NOPAGE
.END
```

```
**** MOSFET MODEL PARAMETERS
      JUL      JUL1
      NMOS     PMOS
      LEVEL 1      1
      L 100.000000E-06 100.000000E-06
      W 100.000000E-06 100.000000E-06
      VTO      1      -1
      KP 200.000000E-06 200.000000E-06
      GAMMA    0      0
      PHI     .6     .6
      PBSW    .8     .8
      TOX     0      0
```

```
**** SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE NODE VOLTAGE
( 1) 10.0000 ( 2) 0.0000 ( 3) -403.1E-21 ( 4) -10.0000
```

#### VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
V1	-1.001E-11
V2	1.001E-11
Vin	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 2.00E-10 WATTS

```
**** OPERATING POINT INFORMATION  TEMPERATURE = 27.000 DEG C
**** MOSFETS
```

NAME	M1	M2
MODEL	JUL	JUL1
ID	1.00E-11	-1.00E-11
VGS	4.03E-19	4.03E-19
VDS	1.00E+01	-1.00E+01
VBS	0.00E+00	0.00E+00
VTH	1.00E+00	-1.00E+00
VDS	0.00E+00	0.00E+00
GM	0.00E+00	0.00E+00
GDS	0.00E+00	0.00E+00
GMB	0.00E+00	0.00E+00
CBD	0.00E+00	0.00E+00
CBS	0.00E+00	0.00E+00
CGSOV	0.00E+00	0.00E+00
CGDOV	0.00E+00	0.00E+00
CGBOV	0.00E+00	0.00E+00
CGS	0.00E+00	0.00E+00
CGD	0.00E+00	0.00E+00
CGB	0.00E+00	0.00E+00

\*\*\*\* INITIAL TRANSIENT SOLUTION    TEMPERATURE = 27.000 DEG C

NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE	NODE	VOLTAGE
( 1 )	10.0000	( 2 )	0.0000	( 3 )	-403.1E-21	( 4 )	-10.0000

#### VOLTAGE SOURCE CURRENTS

NAME	CURRENT
V1	-1.001E-11
V2	1.001E-11
Vin	0.000E+00

TOTAL POWER DISSIPATION 2.00E-10 WATTS

\*\*\*\* FOURIER ANALYSIS            TEMPERATURE = 27.000 DEG C  
 FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(3)

DC COMPONENT = -1.899772E-04

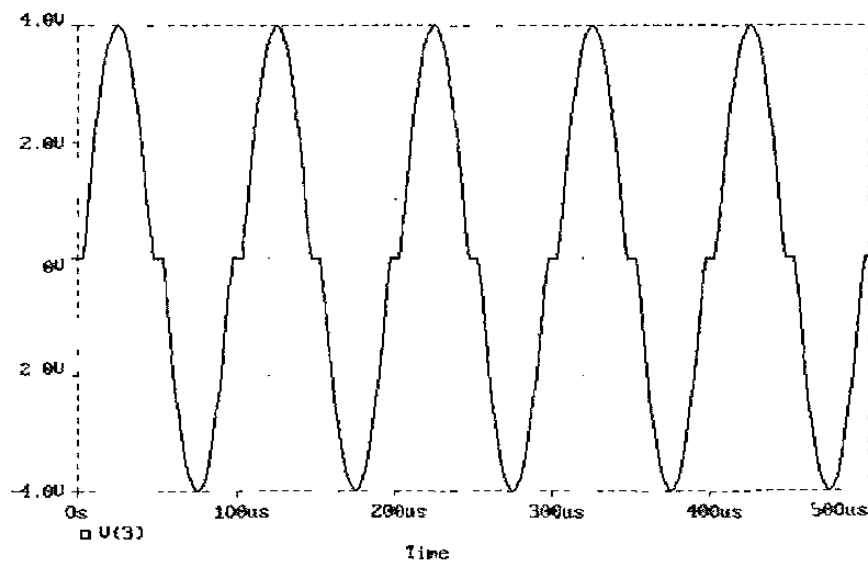
HARMONIC FREQUENCY FOURIER NORMALIZED PHASE  
 NORMALIZED

NO	(HZ)	COMPONENT	COMPONENT (DEG)	PHASE (DEG)
1	1.000E+04	3.727E+00	1.000E+00	-3.794E-03
2	2.000E+04	6.398E-04	1.717E-04	-7.878E+01
3	3.000E+04	3.982E-01	1.068E-01	-1.800E+02
4	4.000E+04	6.926E-04	1.858E-04	-1.482E+02
5	5.000E+04	2.120E-01	5.687E-02	-1.800E+02
6	6.000E+04	8.498E-04	2.280E-04	-1.741E+02
7	7.000E+04	1.253E-01	3.363E-02	1.800E+02
8	8.000E+04	1.006E-03	2.699E-04	1.683E+02
9	9.000E+04	7.403E-02	1.986E-02	1.798E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.271601E+01 PERCENT

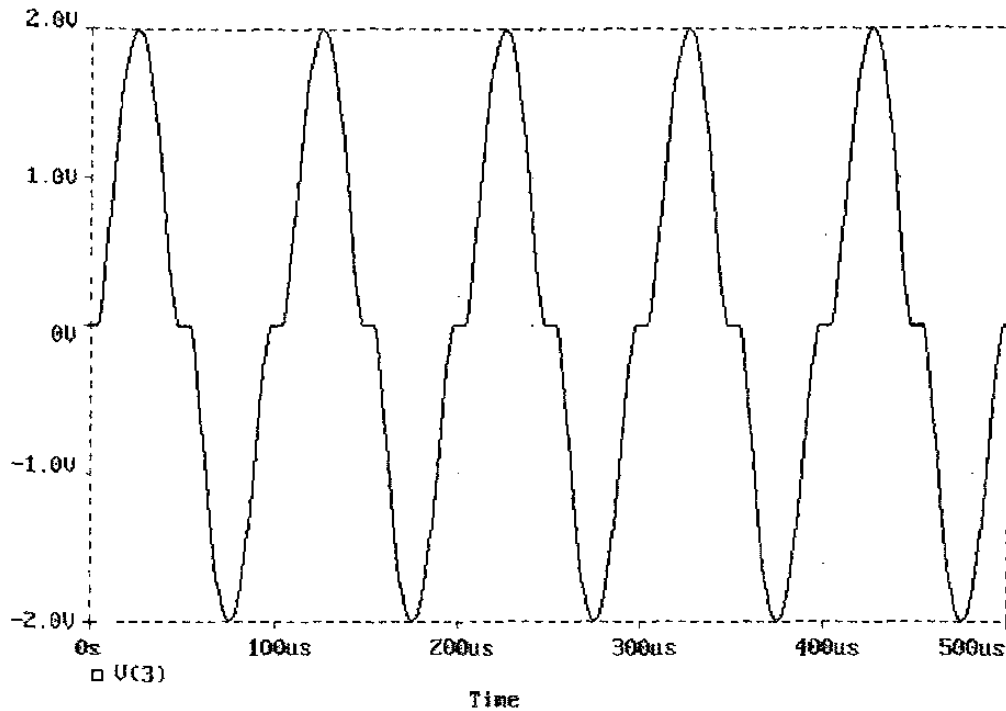
JOB CONCLUDED

TOTAL JOB TIME        33.



Log Auto-range Set\_range Restrict\_data X\_variable Fourier  
 Performance\_analysis

Fig. 3.14A. Gráfica de Vout con RL=1000MEG



```

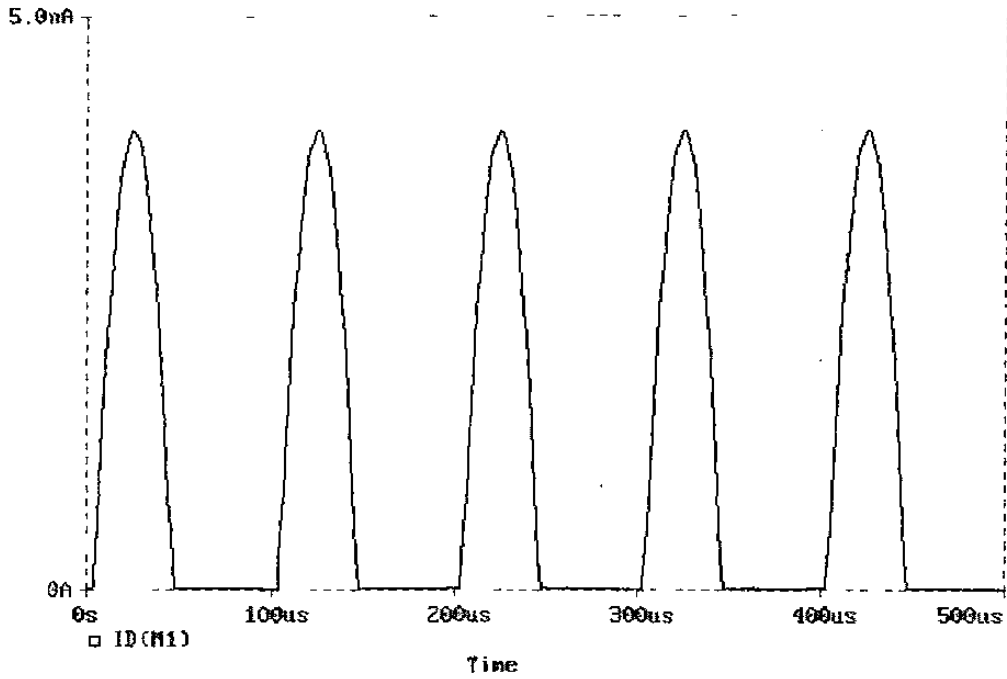
File Log Auto-range Set_range Restrict_data X_variable Fourier
Performance_analysis

```

Fig. 3.14B. Gráfica de  $V_{out}$  con  $R_L=5K$

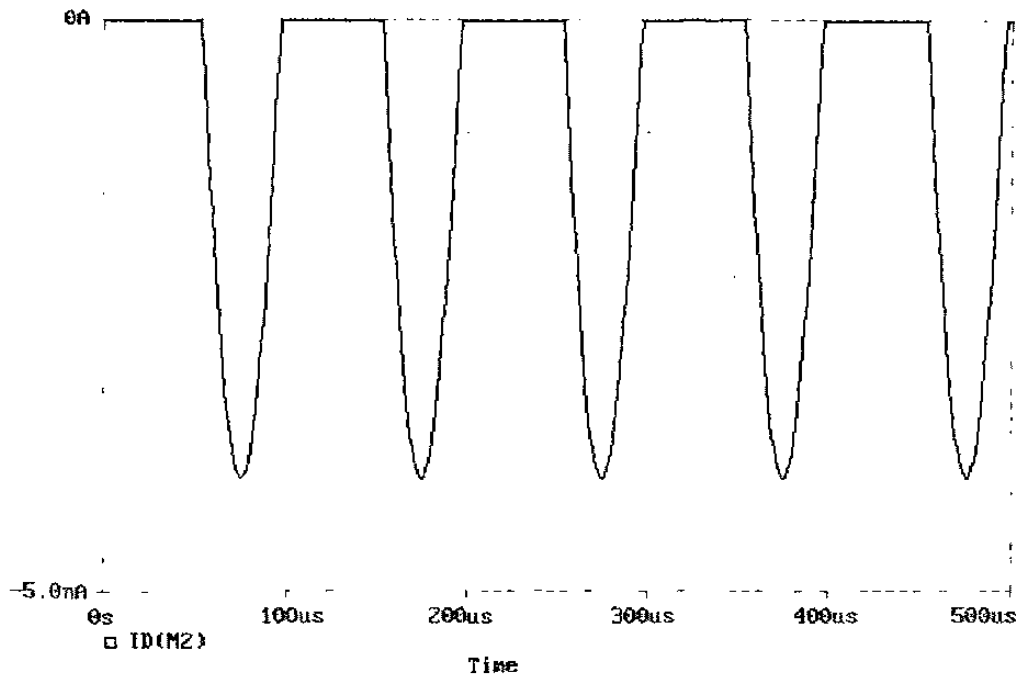
En las gráficas anteriores en (a) se muestra el valor de  $V_{out}$  cuando  $R_{load}$  es muy grande (1000Meg), siendo este de 4 volts, y en la gráfica (b) se muestra el mismo valor de  $V_{out}$  pero con  $R_{load}$  mucho más pequeña (5K), aquí se observa que el voltaje de salida es la mitad que el voltaje de entrada, cabe hacer mención que la solución de este problema se toma como aceptable el valor de  $R_{load}$  de 11.1K. Mediante el análisis de Fourier se puede saber que el porcentaje de distorsión que ocurre en la gráfica de salida usando Spice es de 12.71%.

Además se adjuntan las gráficas de dren con lo que podemos darnos cuenta como actúan en complemento estos dos transistores, también se alcanza apreciar el tiempo que generan la distorsión, la cual ocurre cuando ambos están inactivos.



**Exit** Log Auto-range Set\_range Restrict\_data X\_variable Fourier  
Performance\_analysis

Fig. 3.15A. Gráfica de las corrientes de dren +



**Exit** Log Auto-range Set\_range Restrict\_data X\_variable Fourier  
Performance\_analysis

Fig. 3.15B. Gráfica de las corrientes de dren -

### 3.4. - GUIA DE REFERENCIA DEL EMTP.

El paquete EMTP (Electromagnetic Transients Program) [13], es un programa computacional usado para simular transitorios en sistemas electromagnéticos, electromecánicos y control, sobre sistemas eléctricos de potencia. En esta sección presentaremos los comandos necesarios para correr el EMTP y obtener las gráficas de los sistemas computarizados. Esta sección esta tomada de las notas del M.C. Enrique Betancourt Ramirez, de la materia Transitorios Electromagnéticos.

Para cargar este paquete en la computadora, se debe de contar con una memoria caché de 560Kb, y se crea el directorio en de la siguiente manera:

```
C:\>EMTP ↵
```

```
C:\> copydisk a:\*. * ↵
```

Pkxarc-e emtp.arc ↵ (descarga los archivos y queda grabado en C).

TP1.exe ejecuta la simulación.

Plot21e.com es la salida de las gráficas.

Startup es el parámetro de control.

El programa corre creando el archivo “caso”, Edit “caso.dat”, en el cual se especificaran los datos del circuito y parámetros de control. Se recomienda tomar el caso ya probado y reeditar.

Para correr la simulación, tomamos TP1.exe

```
>>disk (envia a la salida del disco).
```

```
>>caso. (lee el caso.dat)
```

```
>>caso.lis
```

```
>>nombre. (nombre.lis)
```

```
>>nombre
```

```
>>stop (sale a dos).
```

En el editor caso.lis, se pueden comprobar parámetros, investigar y corregir errores, tomar lista de las variables de salida.

En el plot21.exe, se lee el caso PL4, y nos presenta las variables en pantalla, para imprimir o para evaluar.

La estructura básica de un archivo de entrada del EMTP [13],[14], con algunos formatos para las instrucciones se presentaran según el problema que se especifique, los dibujos que se obtienen se incluyen en el archivo. La estructura del archivo de entrada se muestra en la Tabla 3.4. Muchas secciones se encuentran separadas por una carta blanca. Por conveniencia, se puede entrar una carta imagen con una carta blanca empezando en la columna 1, el cual será interpretado por el EMTP como una carta blanca. Las líneas de comentario también pueden adherirse al archivo de entrada por medio de "c-blank" en las columnas 1 y 2. Los comentarios adicionales también pueden sumarse al texto después de la carta blanca.

**TABLA 3.4**  
ESTRUCTURA DEL ARCHIVO DE ENTRADA DEL EMTP.

Empiezan los datos nuevos del caso (una línea).	
Tarjetas especiales.	
Tarjeta de datos misceláneos de puntos fijos.	
Tarjeta de datos misceláneos entero.	
TACS Tarjeta de función.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de fuentes.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de dispositivos y variables suplementarias.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de respuesta de salida.	
Carta blanca.	
TACS Tarjeta de condición inicial.	
Carta blanca.	
Tarjeta para Ramas, Transformadores, Cables y Líneas de Transmisión.	
Carta blanca.	
Tarjeta de Interruptores.	



Carta blanca.	
Tarjeta de fuentes.	
Carta blanca.	
Tarjeta de condición inicial.	
Tarjeta de repuesta de salida de voltaje de nodo.	
Carta blanca.	
Tarjeta de respuesta del plot calcomp.	
Carta blanca.	
Carta blanca (Fin del caso).	

Note que los TACS de entrada empiezan antes de la entrada de la red eléctrica. Los formatos de entrada de aquellas tarjetas las cuales son necesarias para simular un transitorio en un circuito RLC se describirán en el orden que aparece en la tabla 3.4. Los formatos de entrada se describen de acuerdo a la notación Fortran.

Empiezan los datos nuevos del caso. Esta tarjeta siempre precede a los datos de entrada. Tarjeta de datos misceláneos de puntos fijos. Esta carta contiene siete parámetros de número real para ser fijados en el campo de ocho columnas. Solo cuatro parámetros se muestran a continuación que se usarán:

DELTAT	TMAX	XOPT	COPT
E8.0	E8.0	E8.0	E8.0

DELTAT es el tiempo utilizado en la simulación. Necesita siempre ser mayor que cero.

TMAX es la longitud de tiempo en segundos a ser simulado. Puede ser igual o menor que cero, en tal caso el EMTP ejecuta una solución de estado estable de las condiciones iniciales únicamente, y no ejecuta una simulación transitoria.

XOPT es la frecuencia de la potencia para propósitos de especificación inductiva. Si es cero o blanco, todas las inductancias estarán en milihenrys. Si es 60.0, por ejemplo, todas las inductancias estarán totalmente como Ohms reactivos a 60 Hz.

COPT es la frecuencia de la potencia para propósitos de especificación capacitiva. Si es cero o blanco, todas las capacitancias estarán en microfarads. Si es 60.0, por ejemplo, todas las capacitancias estarán totalmente en microohms a 60 Hz.

Tarjeta de datos misceláneos entero. Esta tarjeta contiene diez parámetros enteros, los cuales son fijados en un campo de ocho columnas. Solo siete parámetros se muestran a continuación:

IOUT	IPLLOT	IDOUBL	KSSOUT	MAXOUT		ICAT	NENERG
18	18	18	18	18	8X	18	18

IOUT este parámetro especifica la razón a la cual la variable de salida es impresa durante la simulación. Si IOUT es cero o uno, cada etapa de tiempo es impresa durante la simulación. Si  $IOUT=k$ , entonces cada  $k$ ésimo de tiempo será impreso. IOUT puede siempre ser cualquiera de las dos blanca o igual a un número impar. Los números par permiten oscilaciones numéricas que existen los cuales los usuarios no pueden detectar en la salida. Como una alternativa el usuario puede especificar un número muy grande en IOUT para evitar el tiempo de espera de la impresión de salida.

IPLLOT este parámetro especifica la razón a la cual la variable de salida es dibujada durante la simulación exactamente de la misma forma que IOUT controla la salida impresa. IPLLOT puede también ser cualquiera de las dos, blanca o igual a un numero impar.

IDOUBL, si es igual a uno nos producirá una topología de la red enlistando la salida impresa. Usualmente nos checa la conexión de la rama y el interruptor en conjunto con el caso.

KSSOUT, si es igual a uno nos producirá una solución completa de estado estable de voltaje y corriente a ser impresa para cada rama en la red. Si es igual a dos nos producirá únicamente soluciones de estado estable de fuentes e interruptores a ser impresas. Si es

igual a tres nos producirá soluciones de estado estable de las variables de salida de fuentes, interruptores y elementos para ser impresos.

MAXOUT, si es igual a uno nos producirá que el EMTP imprima el máximo valor lograda por cada variable de salida durante la simulación transitoria.

ICAT, si es igual a uno nos producirá que todos los dibujos generados por el EMTP sean salvados sobre el disco para futuras configuraciones por un programa separado.

NENERG, el conjunto nenerg nos ilustra que el cero causará una simulación de interrupción probabilística a ser ejecutada.

Tarjeta para ramas. Los parámetros se fijan en seis columnas. Ya que la precisión está limitada por el número de columnas en los campos de entrada, las inductancias especificadas en ohms o milihenrys, y los capacitores especificados en micromhos o microfarads son usualmente la escala optima de unidad. La resistencia tienen entrada en Ohms. Las variables de corriente de rama y voltaje de salida se especifican en estas tarjetas, donde la salida de voltajes de nodo son especificados cerca del final de la entrada EMTP como se muestra en la tabla 3.5. El formato de la tarjeta de ramas de entrada se muestra a continuación.

	BUS K	BUS M		R	L	C		RAMA DE SALIDA
2X	A6	A6	12X	E6.0	E6.0	E6.0	35X	11

Este formato es para ramas monofásicas las cuales no usan la facción de rama de referencia. El Bus K y M son los seis caracteres de los nombres de los nodos del diagrama esquemático del sistema. Se debe de tener cuidado para asignar un único nombre al nodo. Los parámetros R, L y C son la resistencia, inductancia y capacitancia (en serie) de la rama. Uno de estos parámetros necesita ser distinto de cero. Si cualquiera de los dos Bus K o Bus Mes blanco, la rama se asume como conectada al nodo de tierra. La salida de la rama es un entero único el cual requiere la salida de la variable de la

rama. Utilizaremos el uno para contestar la salida de corriente del inductor. Otras opciones incluye el dos para tener la salida de voltaje diferencial de la rama, un tres para tener ambas salida de voltaje y corriente, y un cuatro para tener la salida de potencia y energía de la rama.

**TABLA 3.5**

**PROGRAMA AUXILIAR DEL EMTP.**

Constante de Líneas – Calcula los datos de entrada del EMTP para cabezales de líneas.
Constante de cables – Calcula los datos de entrada del EMTP para cables, o para cabezales de líneas de transmisión.
Jmarti, Setup, Semlyen Setup, Haver Setup, Weight – Estos programas calculan datos para varios modelos de líneas dependientes de la frecuencia en el EMTP.
Xformer, Treleg, Bctran – Estos programas calculan modelos de matriz de impedancias para transformadores desde datos de prueba de corto circuito.
Saturación – Acceso de ganancia para los siguientes tres programas:
Convert – Calcula datos para saturación de núcleos de transformadores.
Hysdat – Calcula datos para modelos de histéresis en núcleos de acero.
Arrdat – Calcula datos para modelos de apartarrayos no lineales.

Tarjeta para interruptores. El formato de estas tarjetas es similar al de las tarjetas de ramas, excepto que el interruptor puede abrir o cerrar. El modelo de interruptor del EMTP permite una operación de apertura-cierre durante la simulación. El formato de entrada del interruptor se muestra a continuación:

	BUS K	BUS M	T-CIERRE	T-APERTURA		RAMA DE SALIDA
2X	A6	A6	E10.0	E10.0	45X	II

El interruptor esta conectado entre los nodos Bus K y Bus M, uno de los cuales puede ser carta blanca para indicar un interruptor a tierra. T-cierre y T-apertura estan especificados en segundos. Un T-cierre negativo puede usarse para indicar si un interruptor esta cerrado en estado estable. Si T-apertura es blanco o es asignado con un valor mayor que Tmax, el interruptor nunca abrirá durante la simulación. Las salidas de

las corrientes y voltajes de rama pueden también ser una respuesta para los interruptores en la misma forma como para las ramas.

Tarjetas de fuentes. Una variedad de tipos de fuentes se aprovechan en el EMTP. Funciones de etapa y funciones senoidales son usadas. Las fuentes pueden ser cualquier voltaje de nodo a tierra o corrientes inyectadas en el nodo. El formato de entrada se muestra a continuación:

TIPO	BUS	V o I	AMPLITUD	FRECUENCIA	ANGULO DE FASE
I2	A6	I2	E10.0	E10.0	E10.0

Tipo es un entero de dos dígitos, I1 = Función de etapa; I4 = Función coseno.

Bus es el nombre del nodo donde la fuente es conectada.

V o I es un entero de dos dígitos, blanca = Fuente de voltaje; -1 = Fuente de corriente.

Amplitud es el nivel de la etapa del voltaje o corriente, o la amplitud en pico unitario de línea a tierra de la onda coseno.

Frecuencia es la frecuencia en Hertz de la función coseno (blanca para la función etapa).

Angulo de fase es el ángulo de la fase en grados de la función coseno (blanca para la función etapa). Estas fuentes del EMTP empiezan activas en los primeros instantes de la etapa de la simulación transitoria.

Tarjeta de condiciones iniciales. Estas son comúnmente usadas para especificar cargas súbitas en el capacitor. Para cada capacitor, una tarjeta es utilizada para nombrar el voltaje del nodo inicial en cada terminal y otra tarjeta es usada para especificar el corriente y el voltaje propio del capacitor. Los formatos para esta tarjeta se muestran a continuación:

IDENT	BUS K	V
I2	A6	E15.8

IDENT	BUS K	BUS M	I	VE15.8
I2	A6	A6	E15.8	

Ident = 2 para la tarjeta de voltaje de nodo.

Ident = 3 para la tarjeta de voltaje y corriente de rama.

Bus = nodo nombre de una terminal del capacitor.

Bus K y Bus M son los nombres de los nodos de las terminales de rama del capacitor.

V = cambio de voltaje en el capacitor.

I = 0 para un cambio con carga DC.

Tarjeta de voltaje de salida de nodo. Estas tarjetas siguen inmediatamente de las tarjetas de condición inicial. Como opuesta a las corrientes y voltajes de rama, estas tarjetas especifican las salidas de los voltajes de nodo a tierra. Una única tarjeta puede ser usada con un "1" en la columna 2 para contestar todos los voltajes de nodo a su salida. En este caso, no se usa la tarjeta blanca en la cual normalmente termina la tarjeta de salida de voltaje de nodo. Para seleccionar el voltaje de nodo individual a su salida, se usa el siguiente formato, en donde cada tarjeta contiene nombre de nodos de los voltajes de salida. Mas que una tarjeta de voltaje de salida de nodo puede usarse si hay a lo más 13 voltajes de salida. En cada tarjeta, el Bus 1 necesita ser distinto de blanca.

	BUS 1	BUS 2	.....	BUS 13
2X	A6	A6		A6

Tarjeta de respuesta de dibujo. Las tarjetas de cantidad de dibujo caen en dos grupos generales. El primer grupo especifica la línea de impresión o dibujos Calcomp, junto con el título del dibujo. Esta tarjeta se muestra a continuación:

Tarjeta de respuesta de dibujo.

2X	CALCOMP PLOT o PRINTER PLOT
----	-----------------------------

Tarjeta de título del caso.

I2	Formato alfabético (superior a 78 caracteres)
----	---

Calcomp plot puede no ser operacional en cada instalación, pero Printer Plot siempre producirá gráficas en el impresor de salida del EMTP usando caracteres alfanuméricos.

Por esta razón, estos gráficos son difíciles de usar en Calcomp Plots. Para especificar cada dibujo individual se usa el formato que se muestra a continuación.

FLAG	TYPE	UNITS	UPI	ORIG	FIN		BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4
I2	I1	I1	E3.0	E4.0	E4.0	9X	A6	A6	A6	A6

Flag es siempre igual a uno en la columna dos.

Type = 4 para un dibujo de voltaje de nodo.

= 8 para un dibujo de voltaje de rama.

= 9 para un dibujo de corriente de rama.

Units = 3 para una escala de tiempo en segundos.

= 4 para una escala de tiempo en milisegundos.

= 5 para una escala de tiempo en microsegundos.

Upi es el número de Units por pulgada.

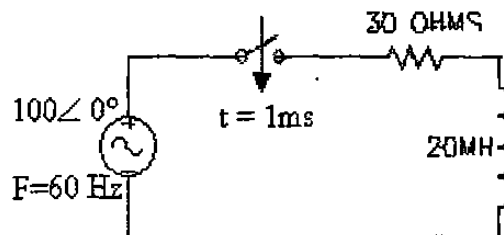
Orig es el comienzo del tiempo (en Units) de el dibujo.

End es el final del tiempo (en Units) de el dibujo.

En muchos caso, Upi, Orig, y End pueden seleccionarse para obtener una longitud total de escala de tiempo de 10 a 12 pulgadas. Upi puede ser una división de escala conveniente, ya que las líneas de la malla pueden dibujarse de uno por pulgada.

En los siguientes casos efectuaremos varias corridas de diferentes circuitos utilizando el paquete computacional EMTP.

CASO 1. Energización de una carga RL monofásica. Simular 5 ciclos de la energización graficar corriente y voltaje en la carga. Medir constante de decaimiento de I. Graficar 5 ciclos de estado estacionario y medir ángulo de voltaje y corriente.



```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN, UNIT=4 FILE=EX1.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN
RECL=8000
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  CALCULO DE TRANSITORIO EN UN CIRCUITO R-L
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS
C  DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart
      .6E-6      .1      60
C  --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<--
      20000      1      1      1
-Icat<-NEnerg<-IPrSup
      1
C  ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----
C      1      0      0
-----<--NSeed
              0
C
C  RAMAS R-L-C
C
C  Bus1->Bus2->Bus3->Bus4-><-----R<-----L<-----C
      N1      N2      20
              0
      N2      30
              3
C              3
BLANK CARD ENDING BRANCHES
C
C  SWITCHES  :
C
C  PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

```





```

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP
BLANK CARD ENDING PLOT CARDS
BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT
BLANK CARD TERMINATING THE CASE
BLANK CARD EXTRA

```

Al correr el programa se obtienen las siguientes gráficas:

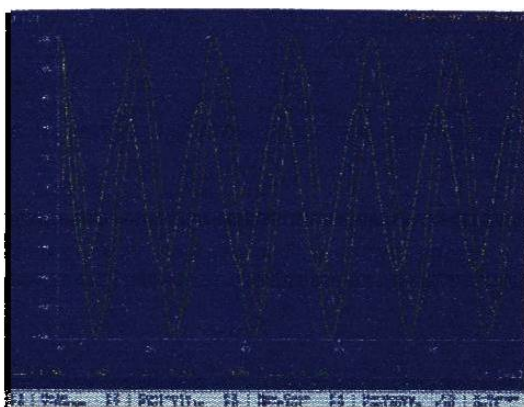


Fig. 3.16. Gráfica de la fuente de voltaje y de las caídas de tensión en R y L.

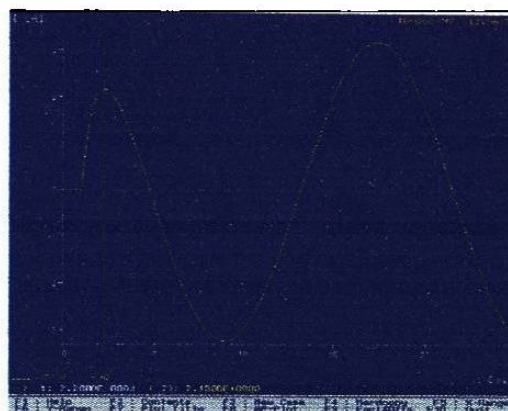


Fig. 3.17. Gráfica de la corriente transitoria I.  $I=1.225A$ .

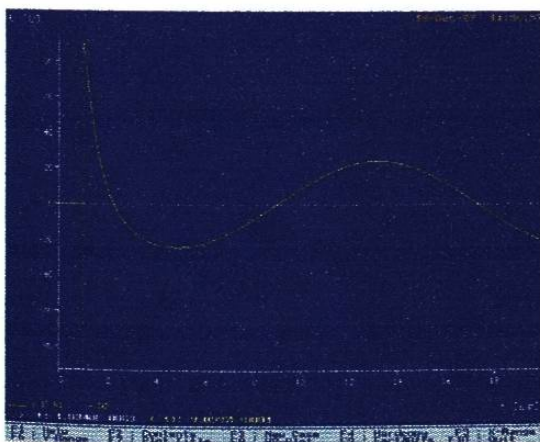


Fig. 3.18. Gráfica del voltaje transitorio en L.

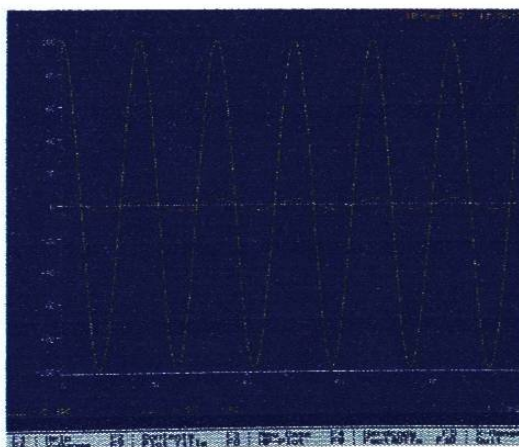
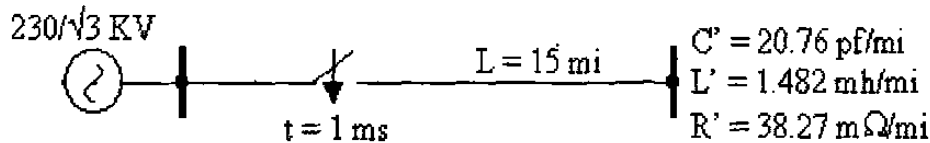


Fig. 3.19. Gráfica de estado estable del voltaje y la corriente (5 ciclos). El ángulo =  $14.11^\circ$

CASO 2. Energizar una línea de transmisión monofásica (tipo 1).

a). Modelo EMTP simulando como línea tipo-1, graficar  $V(t)$  al final de la línea e  $I(t)$  al principio para 5 ciclos, medir frecuencia de oscilación.



```

BEGIN NEW DATA CASE
$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE
$OPEN, UNIT=4 FILE=EX2.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN
RECL=8000
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  EJEMPLO DE PRUEBA PARA MODELO DE LINEAS DE TRANSMISION
CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC
C  TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS
C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart
  2.61E-6  86.3E-3  60
C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<--IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-
  20000   3      1      1      1      1
IPrSup
C ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----<--NSeed
C   1      0      0      0
C  RAMAS R-L-C
C
C Bus1->Bus2->Bus3->Bus4->---R<---L<---C
  SRC1   B1      .0001      3
  N2     N2      10.E9      3
C

```

C LINEAS DE TRANSMISION ( "-1" EN /12/ , SI NO ACOPLADAS! ):

C PARA LINEAS ACOPLADAS: -1 = SECUENCIA CERO

C -2 = SECUENCIA POSITIVA

C -3 = (EN BLANCO)

C

C BUS 1 BUS 2 R L C LONG COD.

C OHM/MI MH/MI UF/MI MI (0,1,2)

C \*\*\*\*\*////// \*\*\*\*\* //// // \*\*\*\*\* //// // \*

-1N1 N2 .038271 .482 .02076 15. 0

C

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C

C SWITCHES :

C

C PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

C TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE T. OPEN (STATISTICS) SALIDA

C \*\*\*\*\* //// //\*\*\*\*\* // //// // \*\*\*\*\* // // /

B1 N1 .001 100. 3

C

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES ( TIPO EN /12/! ):

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C

C BUS 1 T AMPLITUD FREC. ANG.FASE T START T STOP

C \*\*\*\*\* // //// // \*\*\*\*\* // //// // \*\*\*\*\* // //// //

14SRC1 187794.56 60. 0.0 -100.

BLANK CARD ENDING SOURCES

C

C CONDICIONES INICIALES DE VOLTAJE EN CAPACITORES :  
 C  
 C SE USAN DOS O TRES RENGLONES PARA CADA CAPACITOR:  
 C  
 C TARJETAS 1 Y 2 ( "2" EN /12/ ):  
 C  
 C BUS 1,2 VOLTAJE INICIAL  
 C /////\*\*\*\*\*  
 C TARJETA 3 ( "3" EN /12/ ):  
 C BUS 1 BUS 2 CORRIENTE (Y) VOLTAJE (INICIALES EN EL CAPACITOR)  
 C /////\*\*\*\*\*  
 C  
 C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:  
 C  
 C ( TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/  
 C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE" )  
 C  
 C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...  
 C \*\*\*\*\*  
 SRC1 B1 N1 N2  
 BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE  
 \$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP  
 BLANK CARD ENDING PLOT CARD  
 C SALIDAS PARA EL CASO ESTADISTICO  
 C  
 C VOLTAJES DE NODO == 0 EN /2/ (MAX. 3 SALIDAS)  
 C VOLTAJES DE RAMA == -1 EN /1,2/ (MAX. 3 SALIDAS)  
 C VOLTAJE BASE BUS 1 BUS 2 BUS 3 BUS 4 BUS 5 BUS 6  
 C \*\*\*\*\*  
 C 0 230940. FRO4L1  
 BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT

BLANK CARD TERMINATING THE CASE  
BLANK CARD EXTRA

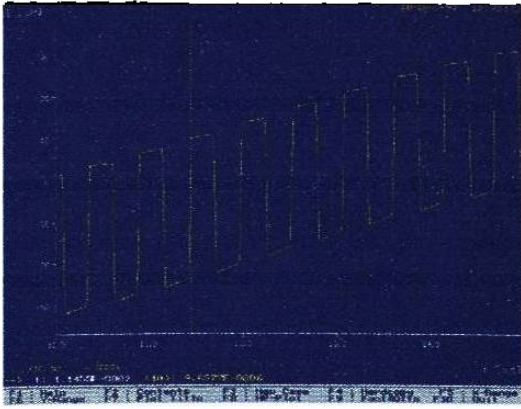


Fig. 3.20. Grafica de la corriente en una línea de transmisión tipo-1 la medición de la frecuencia es  $F=1824$  Hz.

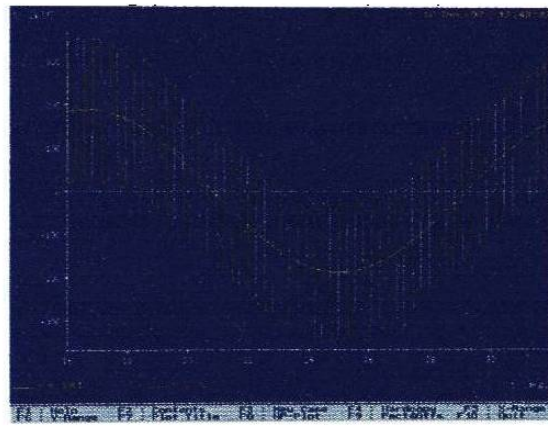
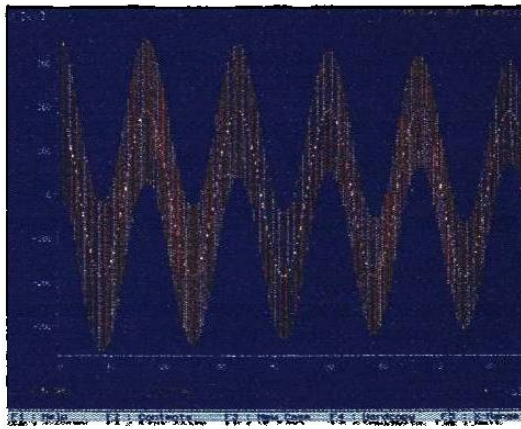


Fig. 3.21. (a) Grafica del voltaje de la fuente y del voltaje al final de la línea de transmisión. (b) Zomm de la grafica.

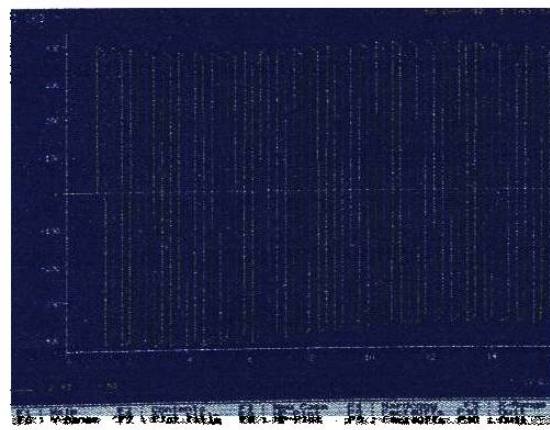
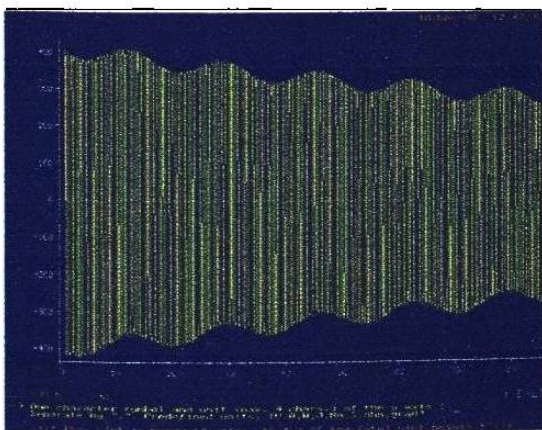


Fig. 3.22. (a) Corriente al principio de la línea de transmisión. (b) Zomm de la grafica.

b) Modelo EMTP como línea II.

BEGIN NEW DATA CASE

□

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE

□

\$OPEN, UNIT=4 FILE=EX2.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN  
RECL=8000

CC

C MODELO DE LINEA DE TRANSMISION II.

CC

C TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS

C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart

55.E-9 84.E-3 0

C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<--IPun<-MemSav<--ICat<-NEnerg<-

20000 3 1 1 1

IPrSup

□

□

C ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----<--NSeed

□

C 1 0 0 0

C

□

C RAMAS R-L-C

□

C

□

C Bus1->Bus2->Bus3->Bus4-><----R<----L<----C O

□

SRC1	B1		5		3
	N2		5.E3		3

C

C LINEAS DE TRANSMISION ( "-1" EN /12/ , SI NO ACOPLADAS! ) :

C PARA LINEAS ACOPLADAS: -1 = SECUENCIA CERO

C -2 = SECUENCIA POSITIVA

C -3 = (EN BLANCO)

C

C BUS 1 BUS 2 R L C LONG COD.

C OHM/MI MH/MI UF/MI MI (0,1,2)

C \*\*\*\*\* // // \*\*\*\*\* // // \*\*\*\*\* // // \*

-1N1	N2	.038271	.482	.02076	15	0
------	----	---------	------	--------	----	---

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C

C SWITCHES :

C

C PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

C TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE T. OPEN (STATISTICS) SALIDA

C \*\*\*\*\* // // \*\*\*\*\* // // \*\*\*\*\* // // /

B1	N1	.001	100.		3
----	----	------	------	--	---

C

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES ( TIPO EN /12/ ! ) :

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C BUS 1 T AMPLITUD FREC. ANG.FASE T START T STOP

C \*\*\*\*\* // // // \*\*\*\*\* // // // \*\*\*\*\* // // //



14SRC1 132790.56 60. 0.0 -100.

BLANK CARD ENDING SOURCES

C

C CONDICIONES INICIALES DE VOLTAJE EN CAPACITORES :

C

C SE USAN DOS O TRES RENGLONES PARA CADA CAPACITOR:

C

C TARJETAS 1 Y 2 ("2" EN /12/):

C

C BUS 1,2 VOLTAJE INICIAL

C // // // // // \*\*\*\*\*

C TARJETA 3 ("3" EN /12/):

C BUS 1 BUS 2 CORRIENTE (Y) VOLTAJE (INICIALES EN EL CAPACITOR)

C // // // // // \*\*\*\*\* // // // // // \*\*\*\*\*

C

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C

C ( TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE" )

C

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C \*\*\*\*\* // // // // // \*\*\*\*\* // // // // // \*\*\*\*\* // // // // // \*\*\*\*\* // // // // // \*\*\*\*\*

SRC1 B1 N1 N2

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

C

C SALIDAS PARA EL CASO ESTADISTICO

C

C VOLTAJES DE NODO  $\equiv$  0 EN /2/ (MAX. 3 SALIDAS)

C VOLTAJES DE RAMA  $\equiv$  -1 EN /1,2/ (MAX. 3 SALIDAS)

C  
 C VOLTAJE BASE BUS 1 BUS 2 BUS 3 BUS 4 BUS 5 BUS 6  
 C \*\*\*\*\*//\*\*\*\*\*//\*\*\*\*\*//\*\*\*\*\*  
 C 0 230940. FRO4L1  
 BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT  
 BLANK CARD TERMINATING THE CASE  
 BLANK CARD EXTRA

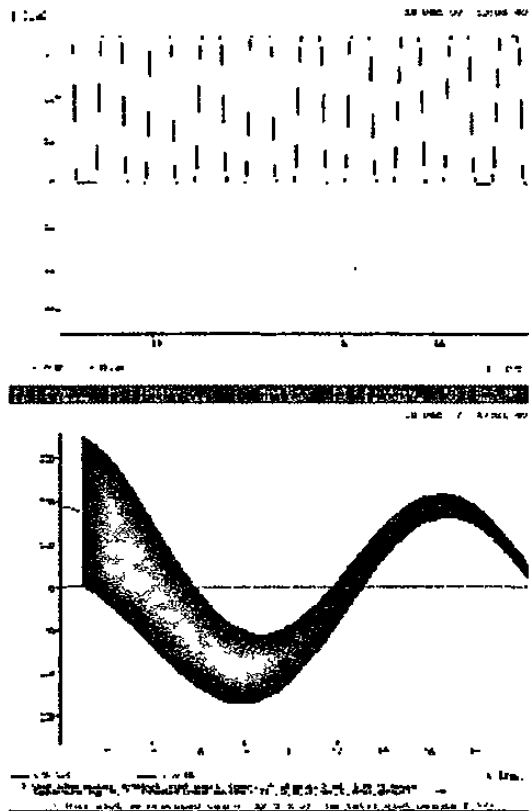


Fig. 3.23. Grafica de la corriente en una línea de transmisión II, la medición de la frecuencia es de 93458 Hz.

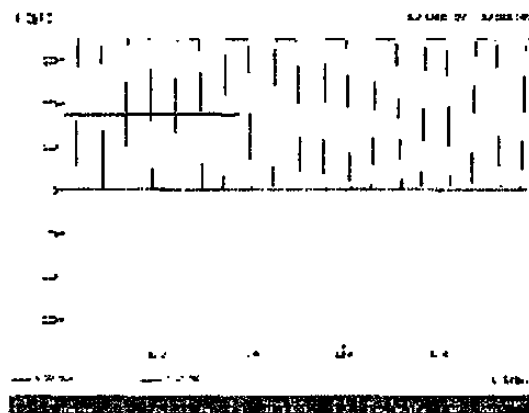


Fig. 3.24. (a) Grafica del voltaje de la fuente y del voltaje al final de la línea de transmisión. (b) Zoom de la grafica.

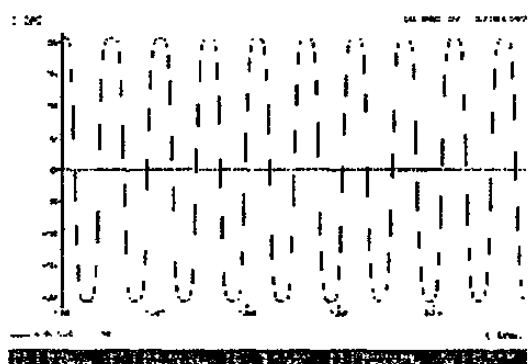
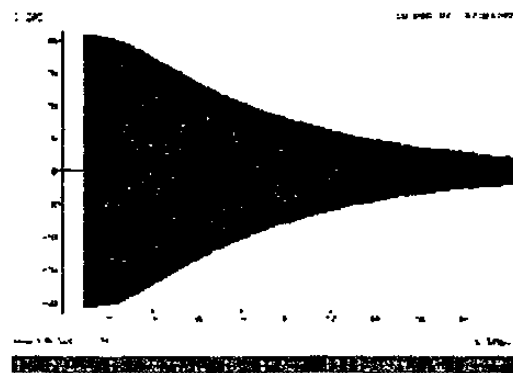


Fig. 3.25. Grafica de la corriente al final de la línea de transmisión. (b) Zoom de la grafica.

CASO 3. Característica V(I) de un apartarrayo de oxido de zinc en el rango -10 - +10  
 KA. Tiene los parámetros: Vref=206600, Vflash=0, Vzero=0, Coeff=1500, Exp=26 y  
 Vmin=0.5.

BEGIN NEW DATA CASE

C

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE

C

\$OPEN, UNIT=4 FILE=EX3.PL4 FORM=UNFORMATTED STATUS=UNKNOWN  
 RECL=8000

CC

C PROBLEMA 3 EXAMEN APARTARRAYOS DE ZNO C

CC

C TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS

C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat<-TStart

3.33E-6 0.070 60. 0

C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-

10000 9 1 1 1 1 1

IPrSup

C ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----< --NSeed

C 1 0 0 0

C APARTARRAYOS

C BUS1 BUS2 BUS3 BUS4 CLAVE O

C \*\*\*\*\* //////////////// \*\*\*\*\* \*

92EQUA 5555 3

C VREF VFLASH VZERO COL

C \*\*\*\*\*////////////////\*\*\*\*\*//

206600. 0. 0.

C COEFF EXPON VMIN

C \*\*\*\*\*////////////////\*\*\*\*\*

1500.                    26.0                    0.5

9999

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C

BLANK CARD ENDING SWITCHES

C

C FUENTES ( TIPO EN /12/ ! ) :

C

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C

C BUS 1 T AMPLITUD    FREC.    ANG.FASE                    T START    T STOP

C \*\*\*\*\* ///////////////    \*\*\*\*\* ///////////////                    \*\*\*\*\* ///////////////

14EQUA    222500.            60.            0.                                    -100.    100.

C

BLANK CARD ENDING SOURCES

C

C

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C

C ( TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/

C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE" )

C

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C \*\*\*\*\*// // // // // \*\*\*\*\*// // // // // \*\*\*\*\*// // // // // \*\*\*\*\*// // // // // \*\*\*\*\*// // // // // \*\*\*\*\*// // // // // \*\*\*\*\*

RECA

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT

BLANK CARD TERMINATING THE CASE

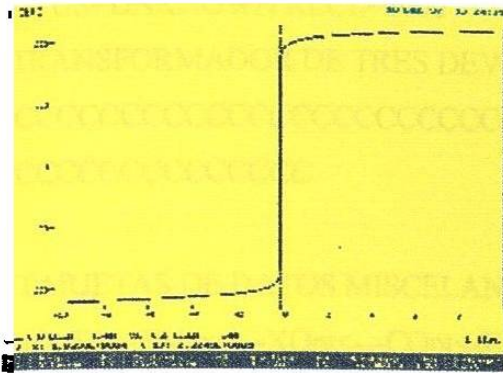


Fig. 3.26. Gráfica V-I ( $\pm 10$  KA).

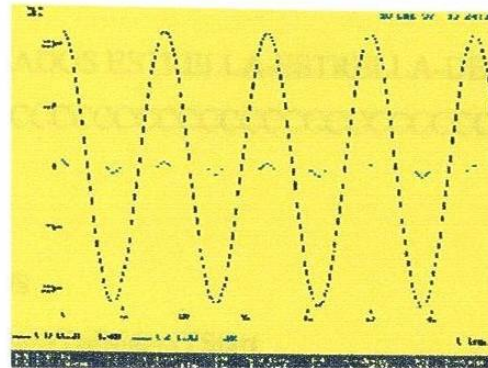


Fig. 3.27. Gráfica del voltaje y corriente respecto al tiempo.

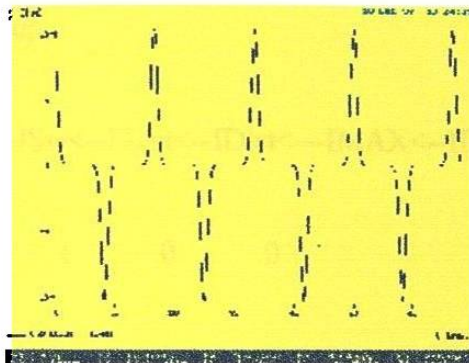


Fig. 3.28. Gráfica de la corriente de disparo del apartarrayos.

CASO 4. Energizar un transformador Y-Y- $\Delta$ , con los siguientes datos:  $S_n=100$  MVA (H-X),  $Z_{HX}=10\%$ ,  $Z_{HY}=20\%$ ,  $Z_{XY}=15\%$  a 100 MVA,  $V_{HLL}=400$  KV Y;  $V_{XLL}=230$  KV Y  $V_{YLL}=13.8$  KV  $\Delta$ . Para cada devanado  $X/R=5$ . La curva de magnetización por fase está dado por la tabla 3.6. a) Comprobar la validez del modelo, midiendo la corriente de excitación, y medir las impedancias de corto circuito. b) Efectuar corridas cerrando la fase A a intervalos de  $15^\circ$  eléctricos desde  $0^\circ$  a  $90^\circ$  (las fases B y C defasadas  $120^\circ$ ). Graficar la corriente  $I_{AH}$ ,  $I_{ABY}$ ,  $V_{A,B,C|X}$  y  $V_{A,B,C|Y}$ . Se anexan las corridas a  $0^\circ$  y a  $15^\circ$ .

BEGIN NEW DATA CASE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=DELETE

C\$OPEN, UNIT=4 FILE=EX43L.PL4 FORM=UNFORMATTED

STATUS UNKNOWN RECL-8000

C TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS ESTRELLA-ESTRELLA-DELTA

CC  
 CCCCCCCCCCCCCCCCCC

C

C TARJETAS DE DATOS MISCELANEOS

C DeltaT<---TMax<---XOpt<---COpt<-Epsiln<-TolMat -TStart

.83E-6 20 E-3 60

C --IOut<--IPlot<-IDoubl<-KSSOut<-MaxOut<---IPun<-MemSav<---ICat<-NEnerg<-

20000 5 1 1 1 0 0 1

IprSup

C ---ISw<--ITest<--IDist<---IMAX<--IDICE<-KSTOUT<-----<--NSeed

C 1 0 0 0

C

C RAMAS R-L-C

C

C Bus1->Bus2->Bus3->Bus4->R<---L<---C 0

NX1 1.E9 1

NX2 1.E9 1

NX3 1 E9 1

C

C TRANSFORMADORES.

C

C TRAFO A

C

C REQUESTWORD REF BUS IEXC-N PSI-N BUS R-EXC

C A V-S OHM

C \*\*\*\*\* / / / / \*\*\*\*\* // // \*\*\*\*\* // //

TRANSFORMER 1.020 773. INTA

C ----RAMA DE EXCITACION:

C CORRIENTE ENLACES DE FLUJO

C        A            V-S

C \*\*\*\*\*//

1.020    773.

1.54     864.72

3.061    952.41

10.2     1039.54

30.61    1082.86

9999

C

C ----DEVANADOS:

C /12/--> NUMERO DEL DEVANADO.

C

C BUS 1    BUS 2        R-CC    L-CC    VUELTAS

C                                    OHM

C // // // // // \*\*\*\*\*        // // // // // \*\*\*\*\* // // // // //

1NH1                                    .3183    400.

2NX1                                    0.035    230.

3NY1                                    6.3E-5    13.8

C

C    TRAFO B

C

C REQUESTWORD REF BUS    IEXC-N    PSI-N    BUS    R-EXC

C                                    A        V-S            OHM

C   \*\*\*\*\*        // // // //        \*\*\*\*\* // // // // \*\*\*\*\* // // // // //

TRANSFORMER                    1.020    773.    INTB

C ----RAMA DE EXCITACION:

C CORRIENTE ENLACES DE FLUJO

C        A            V-S

C \*\*\*\*\* //

1.020	773.
1.54	864.72
3.061	952.41
10.2	1039.54
30.61	1082.86

9999

C

C ----DEVANADOS:

C /12/--&gt; NUMERO DEL DEVANADO.

C

C BUS 1 BUS 2 R-CC L-CC VUELTAS

C

OHM

C//////// \*\*\*\*\* //////////

1NH2 .3183 400.

2NX2 0.035 230.

3NY2 NY1 6.3E-5 13.8

C

C TRAFO C

C

C REQUESTWORD REF BUS IEXC-N PSI-N BUS R-EXC

C

A V-S OHM

C \*\*\*\*\* ////////// \*\*\*\*\* ////////// \*\*\*\*\* //////////

TRANSFORMER 1.02 773. INTC

C ----RAMA DE EXCITACION:

C CORRIENTE ENLACES DE FLUJO

C

A V-S

C \*\*\*\*\* //////////////////////////////////////

1.020 773.

1.54 864.72

3.061 952.41

10.2 1039.54



30.61            1082.86

9999

C -----DEVANADOS:

C /12/--> NUMERO DEL DEVANADO.

C

C BUS 1 BUS 2            R-CC   L-CC   VUELTAS

C                            OHM

C////////\*\*\*\*\*        ////////// \*\*\*\*\* //////////

1NH3			.3183	400.
2NX3			0.035	230.
3	NY2		6.3E-5	13.8

C

BLANK CARD ENDING BRANCHES

C SWITCHES :

C PARA SWITCHES ESTADISTICOS: TCLOSE = MEAN CLOSING TIME

C                            TOPEN = STAND. DEVIATION MEAN CONT.

C

C BUS 1 BUS 2 T. CLOSE   T. OPEN            (STATISTICS)        SALIDA

C

C *****////////*****	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////	//////////
SRC1	NH1	-0.167	100.			3
SRC2	NH2	-0.167	100.			3
SRC3	NH3	-0.167	100.			3

C BLANK CARD ENDING SWITCHES

C FUENTES ( TIPO EN /12/! ):

C GENERADORES CONECTADOS DENTRO DE LA RED

C BUS 1 T AMPLITUD   FREQ.    ANG.FASE            T START    T STOP

C *****	//////////	*****	//////////	//////////	//////////	//////////
14SRC1	326598.	60.	0.	-100.	100.	
14SRC2	326598.	60.	-120.	-100.	100.	
14SRC3	326598.	60.	120.	-100.	100.	

BLANK CARD ENDING SOURCES

C VOLTAJES DE NODO DE SALIDA:

C ( TODOS LOS VOLTAJES DE NODO, SI UNA SOLA TARJETA CON "1" EN /2/  
C Y SE ENMASCARA "BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE" )

C BUS 1 BUS 2 BUS 3 ...

C \*\*\*\*\* // // // // \*\*\*\*\* // // // // \*\*\*\*\* // // // // \*\*\*\*\* // // // // \*\*\*\*\* // // // // \*\*\*\*\*

SRC1 NX1 NY1 NH1

SRC2 NX2 NY2 NH2

SRC3 NX3 NNH

BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE

\$CLOSE, UNIT=4 STATUS=KEEP

BLANK CARD ENDING PLOT CARDS

BLANK CARD TERMINATING STATISTICS OUTPUT

BLANK CARD TERMINATING THE CASE

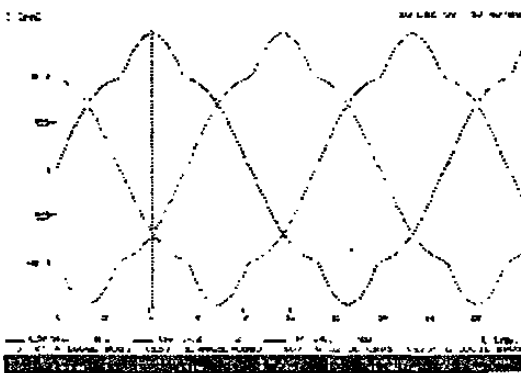


Fig. 3.29. Gráfica de la corriente de excitación.  $I_{exc}=1.4465$  mA.

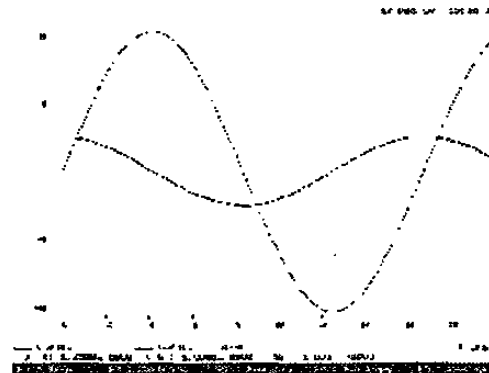


Fig. 3.30. Medición de  $Z_{HX}=V_H/I_X$ ,  $V_H=252$ V,  $I_X=1033.2$ A,  $Z_{HX}=0.243$

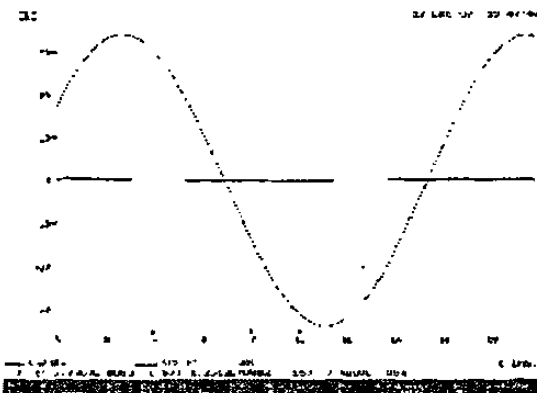


Fig. 3.30. Medición de  $Z_{HY}=V_H/I_Y$ ,  $V_H=252$ V,  $I_Y=34,080$ A,  $Z_{HY}=0.00739$

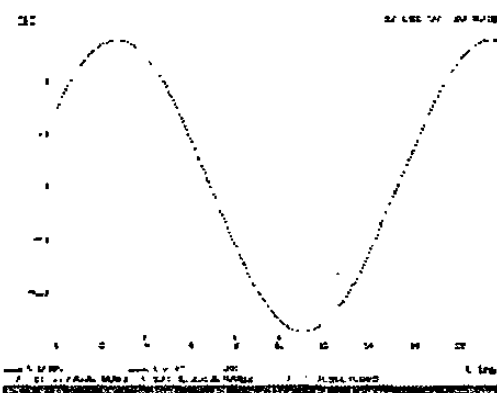


Fig. 3.31. Medición de  $Z_{XY}=V_X/I_Y$ ,  $V_X=252$ V,  $I_Y=138.56$ KA,  $Z_{XY}=0.001818$

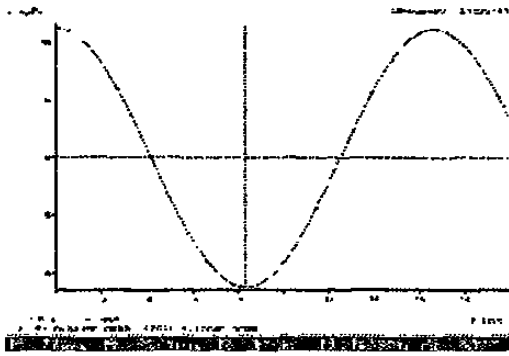


Fig. 3.32. Corrida a  $0^\circ$  de  $I_{AB}$ .

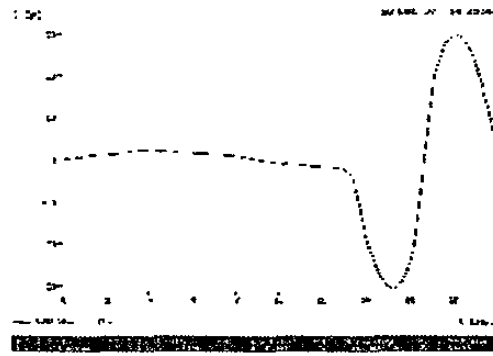


Fig. 3.33. Corrida de  $0^\circ$  de  $I_{AH}$ .

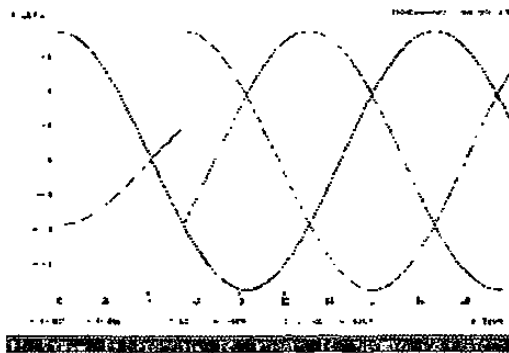


Fig. 3.34. Voltajes A, B y C en X.

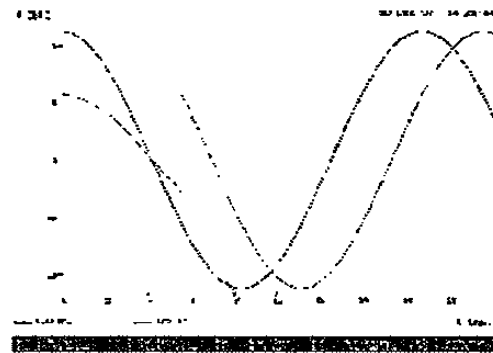


Fig. 3.35. Voltajes A, B en Y,  $V_c$  esta aterrizado.

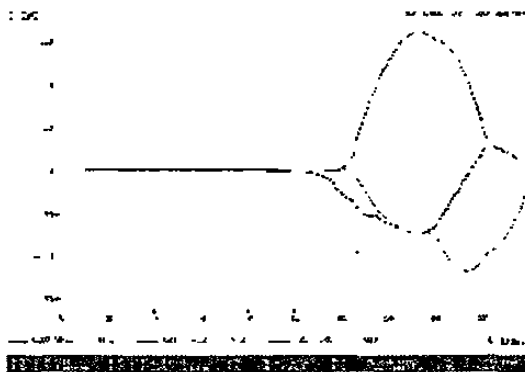


Fig. 3.36. Corrida a  $15^\circ$  de  $I_{ABC}$  en H

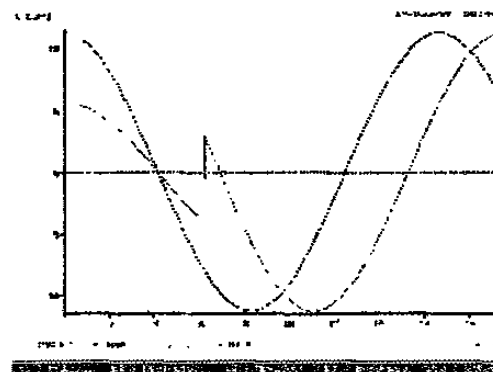


Fig. 3.37. Corrientes A y B a  $15^\circ$  en Y, C esta aterrizado.

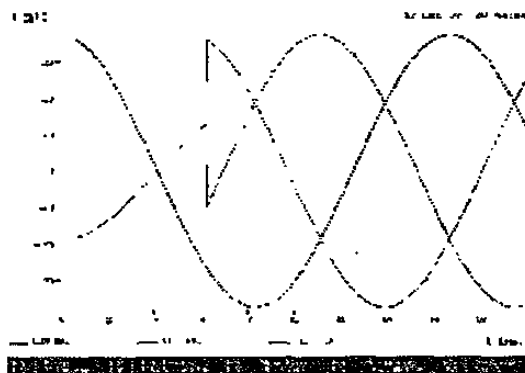


Fig. 3.38. Voltajes A, B y C en X, a  $15^\circ$ .

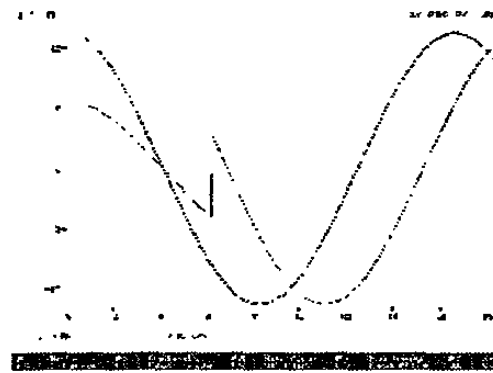


Fig. 3.39. Voltajes A y B en Y a  $15^\circ$ , C esta aterrizado.