

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

CALCULO DIGITAL DE VOLTAJES Y
=====
CORRIENTES TRANSITORIOS
=====

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICO EN LA ESPECIALIZACION
DE POTENCIA

HERMAN PATRICIO NOVOA DE LA TORRE

Quito, Agosto de 1977

C E R T I F I C A D O
=====

CERTIFICO QUE LA PRESENTE TESIS HA SIDO
REALIZADA EN SU TOTALIDAD POR EL SEÑOR
HERMAN PATRICIO NOVOA DE LA TORRE.



ING. PATRICIO ORBE G.

DIRECTOR DE TESIS

A G R A D E C I M I E N T O :

Presente mis sentimientos de gratitud al Señor Ingeniero Patricio Orbe Garcés, quien con su guía hizo posible el desarrollo del presente - trabajo.

A todo el personal que constituye el Departamento de Computación de la Escuela Politécnica Nacional, Al Ing. Efraín del Pino por su valiosa colaboración.

D E D I C A T O R I A :

A LA MEMORIA DEL SEÑOR DON

EZEQUIEL DE LA TORRE

S U M A R I O

=====

La finalidad del presente trabajo, es la aplicación de métodos numéricos en el estudio de las "Ondas Viajeras" y su propagación en sistemas eléctricos de transmisión.

El estudio que finaliza con la formulación de un programa digital destinado a calcular la magnitud de las ondas de voltaje y corriente en función del tiempo, producidas en los puntos de transición adopta como métodos de solución, el establecimiento de ecuaciones diferenciales para el cálculo de las ondas reflejadas y transmitidas en los puntos de discontinuidad y el sumatorio en celocía o látice para encontrar la señal ante la presencia de reflexiones sucesivas.

Si bien es cierto que el camino del establecimiento de ecuaciones diferenciales es un proceso poco usado en trabajos de este tipo, su empleo facilita la modelación general de los sistemas a la vez que asegura mayor precisión en los resultados.

En general esta tesis abarca puntos como la modelación de un sistema, representación de los elementos del sistema, análisis teórico del fenómeno, formulación, descripción y forma de utilización del programa.

Para darle validez y consistencia al trabajo, el programa ha sido aplicado a casos particulares cuyos resultados son ya conocidos en la práctica o por la aplicación de programas similares, habiéndose obtenidos los resultados esperados.

I N D I C E :
=====

Pág.

CAPITULO I : GENERALIDADES

1.1. Introducción	1
1.2. Las ondas viajeras y su efecto en los elementos de un sistema.	2
1.3. Estudios similares y sus características.	3
1.4. Ecuaciones diferenciales para la modelación de una discontinuidad.	4
1.5. El diagrama de enrejado como solución a las reflexiones sucesivas.	5

CAPITULO II : REPRESENTACION DE LOS PARAMETROS DE UN SISTEMA PARA EL ESTUDIO DE ONDAS VIAJERAS.

2.1. Parámetros distribuídos.	7
2.2. Parámetros concentrados.	9
2.2.1. Parámetros constantes.	9
2.2.2. Parámetros variables.	11
2.2.3. Cargas del sistema.	11

CAPITULO III : MODELO MATEMATICO PARA EL ESTUDIO DE ONDAS VIAJERAS.

3.1. Introducción	13
3.2. Formación de las matrices "tiempos de <u>propagación</u> " y "coeficientes de reflexión <u>para</u> voltajes y corrientes.	14
3.3. Ecuaciones que definen la forma de onda de las señales reflejada y transmitida para una función paso incidente.	16

	Pág.
3.4. Descomposición de una onda de forma arbitra ria en funciones paso.	19
CAPITULO IV : REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS PERTURBACIONES.	
4.1. Descargas atmosféricas	22
4.2. Disturbios por maniobras.	24
4.3. Disturbios por fallas	27
CAPITULO V : PROGRAMA DIGITAL PARA EL CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES TRANSITORIOS	
5.1. Introducción	30
5.2. Programa principal y subrutinas.	30
5.3. Diagramas de flujo	35
5.4. Datos de entrada y resultados	45
5.4.1. Datos generales sobre el sistema	45
5.4.2. Datos particulares sobre la pertur- bación.	46
5.4.3. Resultados de salida.	46
CAPITULO VI : APLICACIONES	
6.1. Angulo de cierre.	49
6.2. Inductancia de la fuente.	53
6.3. Longitud de la línea.	57
6.4. Energización de una línea con carga atrapada	61
CAPITULO VII : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
66	
APENDICE I : MODELACION DE SISTEMAS PARA EL EM- PLEO DEL PROGRAMA.	
Capacidad del programa	1.1
Recomendaciones para la modelación	1.2
Limitaciones	1.3

	Pág.
APENDICE II : MANUAL DEL PROGRAMA	
Codificación de datos	2.1.
REFERENCIAS	

N O M E N C L A T U R A

=====

a_{1-6}, ω	Constantes que definen la forma de onda de una señal en función del tiempo.
e, i	Voltaje, corriente incidentes.
e', i'	Voltaje, corriente reflejados.
e''_k, i''_k	Voltaje, corriente transmitidos.
e_o, i_o	Voltaje y corriente de nodo por la superposición de la onda incidente con la onda reflejada.
e_b	Voltaje de barra.
K, n	Constantes que definen una resistencia variable.
ϕ	Flujo electromagnético.
ψ	Flujo electrostático.
π	Tiempo de propagación de una onda electromagnética en una línea.
Γ	Coefficiente de reflexión.
l	Longitud de una línea.
R, L, C, G	Resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia.
p	Operador de Heaviside.
c	Velocidad de la luz
z_k	Impedancia característica de la línea k.
$Z(p)$	Impedancia equivalente de una barra vista desde una línea, en el dominio de la frecuencia.
$Z_o(p)$	Impedancia equivalente total de una barra vista desde una línea, en el dominio de la frecuencia.
$Z_f(p)$	Impedancia de una fuente en el dominio de la frecuencia.
Y	Admitancia de la línea.
Z	Impedancia de la línea.
$Z_{k(p)}$	Impedancia de conexión de la línea k a una barra en el dominio de la frecuencia.
$Z_g(p)$	Impedancia a tierra de una barra en el dominio de la frecuencia.

C A P I T U L O I

GENERALIDADES.-

1.1. INTRODUCCION: En la operación de una línea de transmisión, es indeseable la presencia de perturbaciones transientes causadas por: descargas atmosféricas, operaciones y maniobras, fallas en el sistema etc. Estas perturbaciones que en forma de ondas viajeras se propagan a lo largo de ella y del sistema del que forma parte², ocasionan efectos negativos y perjudiciales e inclusive daños en los elementos conectados a él.

El conocimiento cabal de la magnitud y duración de estos fenómenos, así como de la respuesta del sistema a los mismos, facilita la selección de un adecuado nivel de aislamiento, el diseño de un conveniente sistema de puesta a tierra y una apropiada coordinación de las protecciones²⁴, traduciendo éstos a su vez en un mejoramiento de la calidad y continuidad del servicio.

Cálculos puramente matemáticos dentro del análisis de este tipo de fenómenos resultan poco prácticos por la cantidad y complejidad de operaciones que requiere su aplicación, complicado además por la innumerable variedad de configuraciones y características que pueden asumir los sistemas y sus elementos.

La modelación física del sistema, sus elementos y características (TNA), para simular las mencionadas perturbaciones y observar sus resultados, va siendo menos práctica cada día, debido a que la complejidad de los sistemas; dificultan su modelación e incrementan el tiempo empleado en ella combirtiéndola en una técnica económicamente desfavorable.

Es necesario desarrollar una técnica caracterizada por:

- Una forma generalizada de aplicación para cualquier sistema.
- Un tiempo de trabajo lo menor posible siempre que económicamente sea viable, y
- Una flexibilidad tal que permita simular con la mayor precisión las condiciones de operación de un sistema.

Programas digitales basados en métodos numéricos de aproximación constituyen una buena alternativa¹⁰, habiéndose logrado excelentes trabajos hasta la presente fecha. Bajo estos mismos lineamientos se ha realizado la presente tesis, aunque apartándose de la técnica de los coeficientes modificados para el tratamiento de los parámetros concentrados hasta ahora empleada²⁴, para plantear y resolver ecuaciones diferenciales en las discontinuidades a fin de lograr mayor precisión en los resultados.

1.2. LAS ONDAS VIAJERAS Y SU EFECTO EN LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA.

El efecto más inmediato que ocasiona una onda al propagarse dentro de un sistema eléctrico, es la fluctuación de voltaje y corriente dentro del mismo^{1,2}, afectando posteriormente a la estructura de sus elementos, de acuerdo a la magnitud y duración de estas fluctuaciones, así como de las características eléctricas de los elementos.

Resulta práctico resumir en forma generalizada los efectos más comunes que se observan en un sistema debido a estas perturbaciones:

- El incremento brusco de voltaje, tiende a ocasionar fallas y descargas a través del aislamiento y origina también fuer

- tes inducciones.
- Una sobretensión, hace operar descargadores y pararrayos y produce daños en el aislamiento de los componentes del sistema.
 - Una corriente elevada, ocasiona daños que pueden ir desde la disminución de la vida útil de un aparato hasta su total destrucción, dependiendo de su capacidad para disipar energía y del tiempo de aplicación de la misma.
 - En general, las variaciones de voltaje y corriente inciden sobre la estabilidad del sistema.

1.3. ESTUDIOS SIMILARES Y SUS CARACTERÍSTICAS:

Estudios detenidos sobre la materia se han realizado paralelamente con el desarrollo de los sistemas de transmisión y distribución eléctricos. Son de carácter y tipo muy variados que van desde experimentales y de observación como los de principio de siglo: E.J. Burham¹², W.S. Franklin¹¹, hasta puramente teóricos y de técnicas avanzadas: R. Wasley^{2, 1}²³, R. Uram¹⁵. Si bien las ideas matemáticas básicas implementadas por Bewley¹ y el uso de su diagrama, no han sido modificados radicalmente, nuevas técnicas se han desarrollado con la finalidad de lograr mayor precisión en sus resultados y facilidad en la implementación de programas digitales para su procesamiento como son: El mismo diagrama de celosía, la transformada modificada de Fourier, la técnica de Shneyder-Bergeron, la modificación de Uram y Miller etc.

Estos métodos aplicados a la solución de problemas en grandes sistemas tanto monofásicos como trifásicos han evolucionado paulatinamente siendo posible observar los avances que han surgido así: La técnica del enrejado o celosía fue desarrollada entre otros por L.O. Bartold y G.K. Carter¹³ A.J. McElroy y R.M. Porter¹⁴, J.P. Bickford y J.P. Doepel¹⁶ métodos gráficos por Arlett y Murrat-Shelley R.¹⁷, H.W. Dommel¹⁸

R.G. Wasley y S. Selvavinayagamoorthy^{2,1,23}. Posteriormente R. Uram y R.W. Miller¹⁵ describen el método de los parámetros distribuidos para voltajes y corrientes como una función del tiempo P. Orbe²⁴ introduce soluciones analíticas para discontinuidades típicas en los programas digitales calculando además las corrientes transitorias que hasta entonces poca o ninguna atención habían recibido.

1.4. ECUACIONES DIFERENCIALES PARA LA MODELACION DE DISCONTINUIDAD.

Al incidir una onda e en un punto de discontinuidad, ésta se descompone en dos nuevas ondas¹: una onda e'' que prosigue a través del punto discontinuo y otra e' que se refleja y regresa por el camino de incidencia, Fig. 1.1. Sus magnitudes están determinadas por las siguientes relaciones:

$$e' = \Gamma . e \quad (1-1)$$

$$e'' = (1 + \Gamma) . e \quad (1-2)$$

$$\Gamma = \frac{Z_0(p) - Z_1}{Z_0(p) + Z_1} \quad (1-3)$$

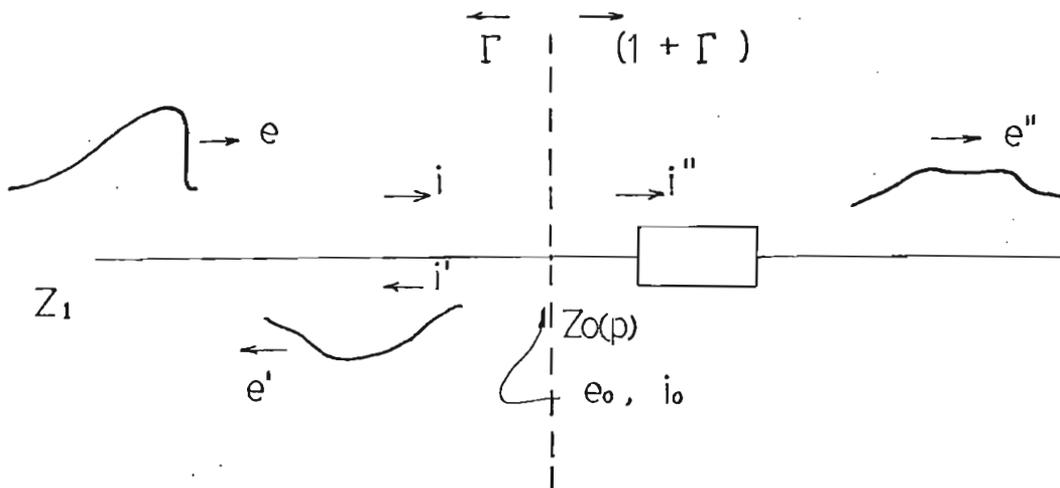


Fig. 1.1. Reflexión de una onda.

Puesto que el coeficiente de reflexión Γ , es función de las características eléctricas de los parámetros concentrados y de las impedancias características de las líneas conectadas al punto discontinuo, al reemplazar éstas en la ecuación (1-3) como funciones de la frecuencia y ésta a su vez en las ecuaciones (1-1) y (1-2), se forman ecuaciones diferenciales cuyas soluciones definen la magnitud y forma de las ondas reflejada y transmitida.

El procedimiento para llegar a establecer las ecuaciones diferenciales en un punto discontinuo, no depende de su topología, sino que es general para todo tipo de discontinuidad, favoreciendo así la formación de un modelo cuyo análisis es aplicable a cualquier sistema.

1.5. EL DIAGRAMA DE ENREJADO COMO SOLUCION A LAS REFLEXIONES SUCESIVAS.

Las ondas producidas por la descomposición de una onda incidente en un punto discontinuo, están sujetas al mismo proceso de descomposición cuando propagándose por una línea alcanzan una nueva discontinuidad, proceso que se repite con cada onda y en cada discontinuidad, dificultando el cálculo de su valor en un tiempo y punto cualquiera.

El valor de voltaje o corriente en un punto y a un tiempo determinados, están dados por la suma de los valores instantáneos a ese tiempo de todas las ondas que se han superpuesto en ese punto y hasta ese tiempo. El cálculo de estos valores se ven facilitados mediante la aplicación de la técnica del enrejado¹, que consiste en la graficación de las señales para simplificar el proceso de suma, disponiendo los puntos discontinuos en ejes de referencia, separados por distancias proporcionales a los tiempos de propagación entre ellos y colocando en el otro eje, la escala de tiempo

para luego simular el viaje de las ondas, determinando en cada punto discontinuo el valor de las ondas en que se descompone, como lo indica la fig. 1.2., para finalmente sumar todas las señales con sus respectivos valores en el punto pedido y hasta el tiempo fijado previamente.

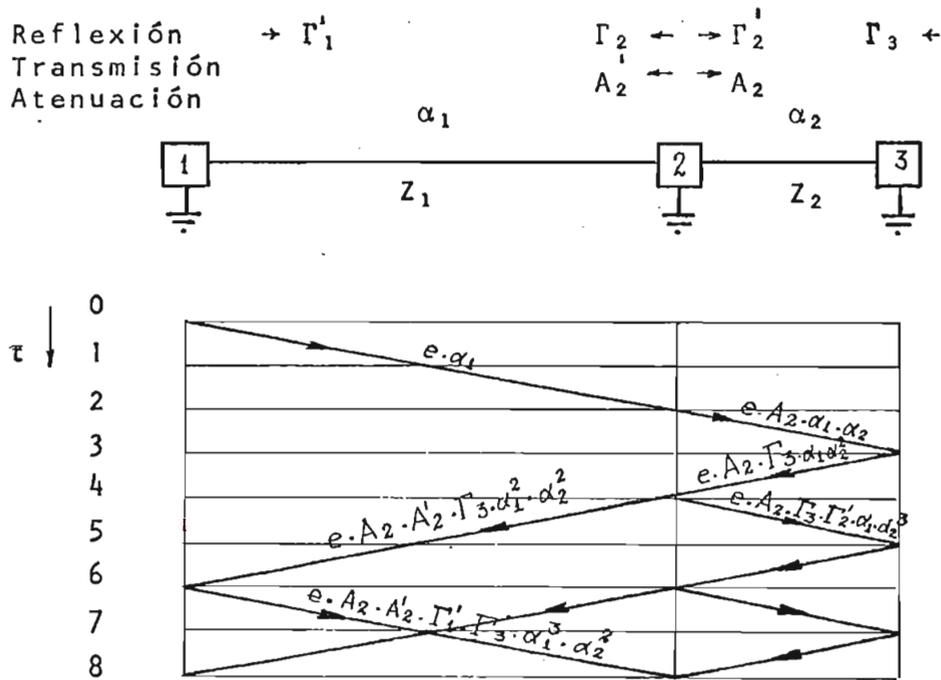


Fig. 1.2. Diagrama de enrejado.

C A P I T U L O I I

REPRESENTACION DE LOS PARAMETROS DE UN SISTEMA PARA EL ESTUDIO DE ONDAS VIAJERAS

2.1. PARAMETROS DISTRIBUIDOS.

Una línea se encuentra caracterizada por cuatro parámetros eléctricos: resistencia (R), inductancia (L), capacitancia (C) y conductancia de dispersión (G) los mismos que se encuentran distribuidos uniformemente a lo largo de ella¹.

Asociado con la onda de voltaje existe un flujo electrostático ψ y con la de corriente un flujo electromagnético ϕ , Fig. 2.1. de modo que para un elemento dx de línea:

$$d\psi = e.C.dx \quad (2-1)$$

$$d\phi = i.L.dx \quad (2-2)$$

La caída de voltaje y la variación de corriente en dicho elemento están definidos por:

$$-de = - \frac{\partial e}{\partial x} dx = i.R.dx + \frac{\partial}{\partial t} (d\phi) \quad (2-3)$$

$$-di = - \frac{\partial i}{\partial x} dx = e.G.dx + \frac{\partial}{\partial t} (d\psi) \quad (2-4)$$

reemplazando en éstas las ecuaciones (2-1) y (2-2) y utilizando el operador de Heavyside

$$-\partial e / \partial x = (R + L.p)i = Z.i \quad (2-5)$$

$$-\partial i / \partial x = (G + C.p)e = Y.e \quad (2-6)$$

cuyas soluciones son:

$$e = \epsilon^{xY} f_1(t) + \epsilon^{-xY} f_2(t) \quad (2-7)$$

$$i = - \sqrt{\frac{Y}{Z}} \{ \epsilon^{xY} f_1(t) - \epsilon^{-xY} f_2(t) \} \quad (2-8)$$

donde

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + L.p)(G + C.p)} \quad (2-9)$$

Si las pérdidas son despreciables, $R = 0$ y $G = 0$

$$\gamma = p \sqrt{LC} = p/c \quad (2-10)$$

ya que

$$c = 1/\sqrt{LC} \quad (2-11)$$

y finalmente

$$\sqrt{Y/Z} = \sqrt{C/L} = 1/z \quad (2-12)$$

Reemplazando (2-10) y (2-12) en (2-7) y (2-8) y aplicando el teorema de Taylor se obtiene que

$$e = f_1\left(t + \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{c}\right) \quad (2-13)$$

$$i = \frac{1}{z} \left\{ -f_1\left(t + \frac{x}{c}\right) + f_2\left(t - \frac{x}{c}\right) \right\} \quad (2-14)$$

Ecuaciones que muestran la existencia de ondas viajeras que se propagan en ambas direcciones a lo largo de la línea, tanto señales de voltaje como de corriente y condicionadas por los parámetros distribuidos de la línea.

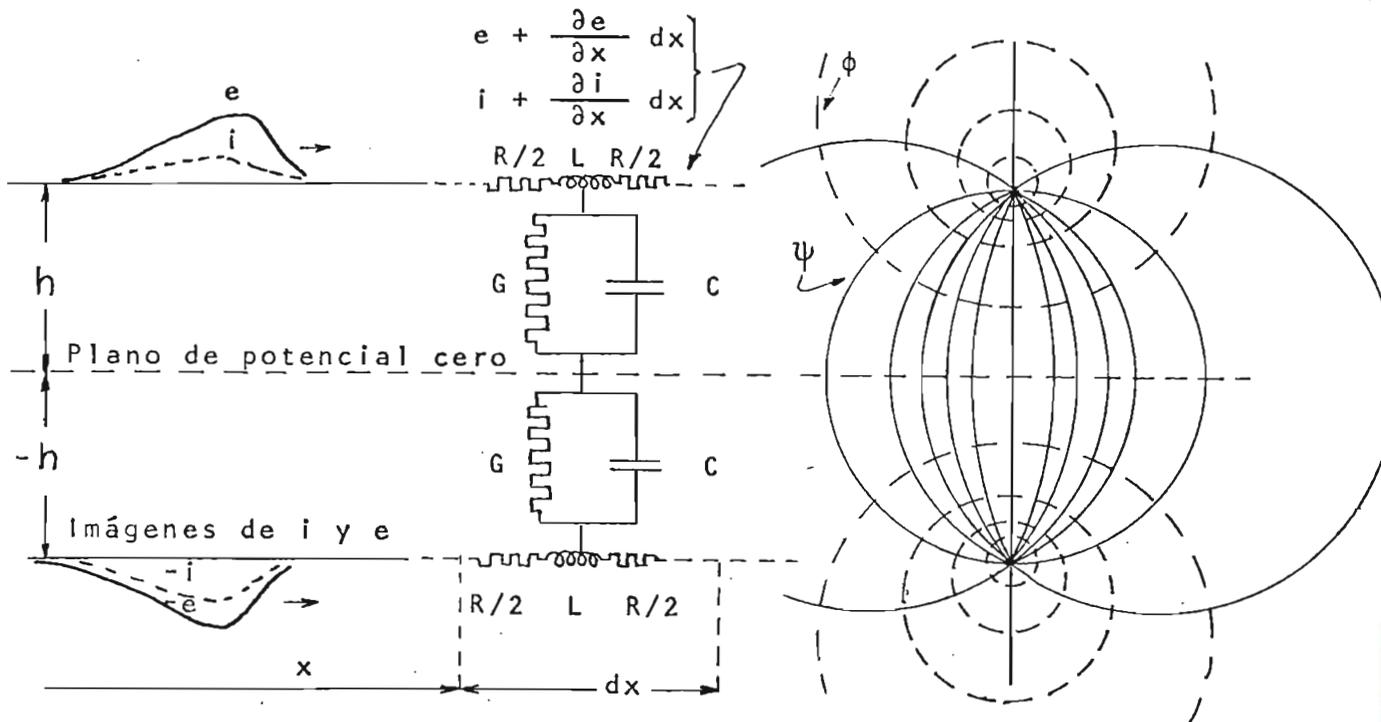


Fig. 2.1. Parámetros distribuidos en un elemento de línea.

2.2. PARAMETROS CONCENTRADOS

2.2.1. PARAMETROS CONSTANTES: Con este nombre se distinguirán los componentes eléctricos del sistema cuyas características se mantienen invariables a lo largo del tiempo independientemente de las magnitudes de voltaje y corriente a las que se encuentres sometidos. En la fig. 2.2. se presenta un cuadro demostrativo - en el que se incluyen las características ideales y reales (cuyos valores responden a condiciones de diseño y montaje) de algunos elementos¹ y que serán considerados en esta tesis a fin de lograr resultados de mayor precisión.

COMPONENTE	C. IDEAL	C. REAL
Resistencias		

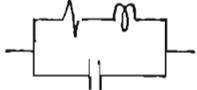
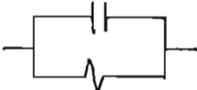
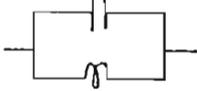
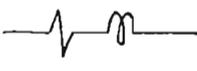
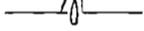
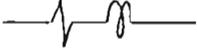
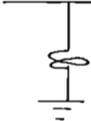
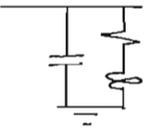
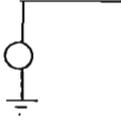
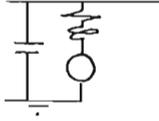
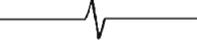
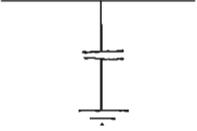
COMPONENTE	C. IDEAL	C. REAL
Reactores inductivos		
Reactores capacitivos		
Divisores de tensión		
Bobinas de choque		
Limitadores de corriente		
Transformadores de corriente		
Transformadores de potencial		
Generadores		
Disyuntores y Seccionadores		
Barras colectoras		

Fig. 2.2. Representación de parámetros concentrados.

2.2.2. PARAMETROS VARIABLES: El caso más típico lo constituyen los limitadores de tensión o descargadores a base de Thyrite. Estos elementos, actúan como una resistencia variable a la magnitud de voltaje al que se encuentran sometidos^{1,2}, ajustándose esta variabilidad a las siguientes relaciones:

$$e = k \cdot i^{1-n} \quad (2-15)$$

$$R = k \cdot i^{-n} \quad (2-16)$$

donde k toma el valor de la caída de tensión en un segmento de Thyrite cuando por él circula una corriente de 1 amp., depende de las dimensiones del segmento y éstas a su vez de la capacidad de energía a disiparse, n es una constante propia de cada segmento cuyo valor es función directa de los componentes utilizados en la construcción del mencionado segmento.

2.2.3. CARGAS DEL SISTEMA: Las cargas de un sistema, si bien se encuentran separadas por la red de distribución, pueden ser tratadas como un cúmulo de parámetros concentrados²; ya que, los tiempos que emplean las señales eléctricas para propagarse dentro de él, son mucho menores que los empleados en el sistema de transmisión. Entonces podrán ser representadas como una rama de impedancia equivalente así:

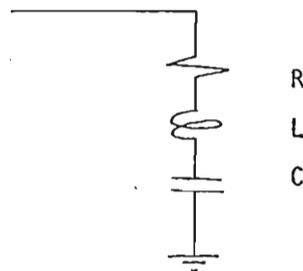


Fig. 2.3. Representación de cargas.

La misma que generalmente tiene valores de L o de C sin, descartar la posibilidad de la existencia conjunta.

C A P I T U L O III

MODELO MATEMATICO PARA EL ESTUDIO DE ONDAS VIAJERAS

3.1. INTRODUCCION: Un sistema eléctrico de transmisión, puede ser considerado como un conjunto de barras, líneas y elementos en una forma determinada de conexión, caracterizada por los parámetros eléctricos de los mencionados elementos.

La conexión entre dos barras cualquiera J e I, puede asumirse constituida por una línea de unión, con determinadas impedancias en cada uno de sus extremos¹ Fig. 3.1.

El viaje de una onda a través de una línea está condicionada por:

- El tiempo que utiliza en alcanzar un extremo
- La atenuación que sufre en su travesía, y
- La magnitud y forma con que se refleja en el extremo alcanzado.

Condiciones que son consecuencia directa de las características de la línea así como de las impedancias conectadas a cada extremo.

Una línea se define por su impedancia característica, su constante de propagación: atenuación y velocidad de propagación. Al agrupar estos valores de todas las líneas de un sistema, resulta conveniente hacerlo mediante la formación de matrices¹³, caracterizándose éstas por ser completamente simétricas y llena de ceros en su diagonal principal ya que en estas posiciones se encuentran los valores de impedancia y atenuación de dos puntos de una misma barra que por definición son nulos.

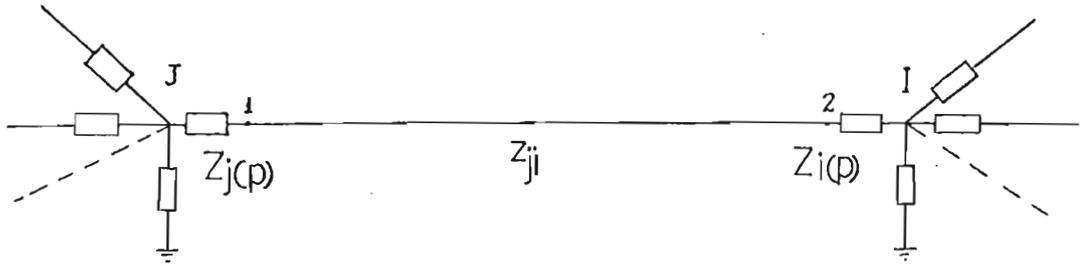


Fig. 3.1. Línea de longitud finita.

Es de anotarse que de no existir pérdidas como es el caso de líneas ideales, la matriz de atenuación se encontrará completamente llena de ceros.

a	1	2	3	4	5
de	1	2	3	4	5
1	0.	z_{12}	z_{13}	\bar{z}_{14}	z_{15}
2	z_{21}	0.	z_{23}	z_{24}	z_{25}
3	z_{31}	z_{32}	0.	z_{34}	z_{35}
4	z_{41}	z_{42}	z_{43}	0.	z_{45}
5	z_{51}	z_{52}	z_{53}	z_{54}	0.

(3-1)

Fig. 3.2. Matriz de impedancias características (cinco barras).

3.2. FORMACION DE LAS MATRICES "TIEMPOS DE PROPAGACION" Y "COEFICIENTES DE REFLEXION PARA VOLTAJES Y CORRIENTES.

De la ecuación (2-11) se desprende que el tiempo utilizado por una onda en viajar a lo largo de una línea, es proporcional a la longitud de ésta. Al agrupar los valores de los tiempos utilizados en la propagación de las señales eléctricas en las líneas de un sistema, se forma una matriz

semejante a las anteriores y con las mismas características¹³, Fig. 3.2.

a	1	2	3	4	5	
de	1	2	3	4	5	
1	0.	π_{12}	π_{13}	π_{14}	π_{15}	
2	π_{21}	0.	π_{23}	π_{24}	π_{25}	
3	π_{31}	π_{32}	0.	π_{34}	π_{35}	
4	π_{41}	π_{42}	π_{43}	0.	π_{45}	
5	π_{51}	π_{52}	π_{53}	π_{54}	0.	(3-1)

Fig. 3.3. Matriz tiempos de propagación (Cinco Barras)

Al referirse a la magnitud y forma de la onda reflejada, de la solución general a las ecuaciones de ondas viajeras aplicadas a una línea ideal, ecuaciones (2-7) y (2-8), y puesto que en su orden los términos de estas responden a las ondas que viajan en sentido negativo y positivo respectivamente¹,

$$e^{(-)} = f_1 \left(t + \frac{x}{c} \right) \quad i^{(-)} = - \frac{1}{z} f_2 \left(t + \frac{x}{c} \right) \quad (3-2)$$

$$e^{(+)} = f_1 \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad i^{(+)} = \frac{1}{z} f_2 \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (3-3)$$

se pueden relacionar entre sí mediante:

$$e^{(-)} / i^{(-)} = -z \quad (3-4)$$

$$e^{(+)} / i^{(+)} = z \quad (3-5)$$

incluyendo condiciones iniciales:

$$x = 0 \rightarrow E(t) = e + Z_1 \cdot i \quad x = l \rightarrow 0 = e \cdot Z_2 \cdot i \quad (3-6)$$

Se llega a:

$$e = \frac{z}{Z_1 + z} \frac{\epsilon^{(\ell-x)\gamma} + \Gamma_2 \epsilon^{-(\ell-x)\gamma}}{\epsilon^{\gamma\ell} - \Gamma_1 \Gamma_2 \epsilon^{-\gamma\ell}} E(t)$$

$$i = \frac{1}{Z_1 + z} \frac{\epsilon^{\gamma(\ell-x)} - \Gamma_2 \epsilon^{-\gamma(\ell-x)}}{\epsilon^{\gamma\ell} - \Gamma_1 \Gamma_2 \epsilon^{-\gamma\ell}} E(t) \quad (3-7)$$

donde Γ_1 y Γ_2 son los coeficientes de reflexión en cada extremo.

$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - z}{Z_1 + z} \quad \Gamma_2 = \frac{Z_2 - z}{Z_2 + z} \quad (3-8)$$

que agrupados en forma de matriz dan una matriz de diagonal nula y asimétrica¹³ puesto que cada valor depende de la impedancia equivalente de una barra vista desde la línea por la que se acerca la onda.

de	1	2	3	4	5
1	0.	Γ_{12}	Γ_{13}	Γ_{14}	Γ_{15}
2	Γ_{21}	0.	Γ_{23}	Γ_{24}	Γ_{25}
3	Γ_{31}	Γ_{32}	0.	Γ_{34}	Γ_{35}
4	Γ_{41}	Γ_{42}	Γ_{43}	0.	Γ_{45}
5	Γ_{51}	Γ_{52}	Γ_{53}	Γ_{54}	0.

(3-9)

Fig. 3.4. Matriz de coeficientes de reflexión (Cinco barras).

3.3. ECUACIONES QUE DEFINEN LA FORMA DE ONDA DE LAS SEÑALES REFLEJADA Y TRANSMITIDA PARA UNA FUNCION PASO IN CIDENTE.

Quando una señal, después de propagarse por una línea, alcanza una barra (punto discontinuo), somete a la línea a

la barra y a las líneas que se encuentren conectadas a esta barra a señales de voltaje y corriente, cuyos valores pueden ser determinados con la ayuda de los coeficientes de reflexión definidos con anterioridad¹. Para visualizar de una mejor manera este procedimiento, considerese el modelo general, Fig. 3.5.

Cuando una señal de voltaje e asociada con una de corriente i propagándose por una línea (adoptando este sentido como positivo), Fig. 3.5., alcanza el nodo 1 se tiene que para $x = l$.

$$e' = \frac{Z_0(p) - z_1}{Z_0(p) + z_1} e = \Gamma_1 e \quad (3-10)$$

$$i' = - \frac{Z_0(p) - z_1}{Z_0(p) + z_1} i = - \Gamma_1 i \quad (3-11)$$

señales reflejadas que se superponen a las incidentes, sometiendo a la línea a una magnitud total

$$e_o = e + e' = (1 + \Gamma_1) e = \frac{2Z_0(p)}{Z_0(p) + z_1} e \quad (3-12)$$

$$i_o = i + i' = (1 - \Gamma_1) i = \frac{2z_1}{Z_0(p) + z_1} i \quad (3-13)$$

el voltaje en el nodo 2 es:

$$e_b = Z(p) i_o = \frac{Z(p)(1 - \Gamma_1)e}{z_1} = \frac{2Z(p)}{Z_0(p) + z_1} e \quad (3-14)$$

finalmente, considerando que el sentido de la onda transmitida, es el mismo que el de la incidente (positivo), ecuación (3-6), y que las impedancias de conexión y las impedancias características de una línea, actúan como divisores de tensión, al aplicar la ley de Kirchhoff al nodo se obtiene:

$$e''_k = \frac{z_k}{Z_k(p) + z_k} \cdot (1 + \Gamma_1) \cdot e = \frac{2Z(p) \cdot z_k}{(Z_0(p) + z_1)(Z_k(p) + z_k)} e \quad (3-15)$$

$$i_k'' = \frac{1}{Z_k(p) + z_k} \cdot (1 - \Gamma_1) \cdot i \cdot Z(p) = \frac{2 Z(p) \cdot z_1}{(Z_o(p) + z_1)(Z_k(p) + z_k)} i \quad (3-16)$$

donde

$$Z(p) = \frac{1}{\frac{1}{Z_g(p)} + \sum_{k=2}^n \frac{1}{Z_k(p) + z_k}} \quad (3-17)$$

$$y \quad Z_o(p) = Z_1(p) + Z(p) \quad (3-18)$$

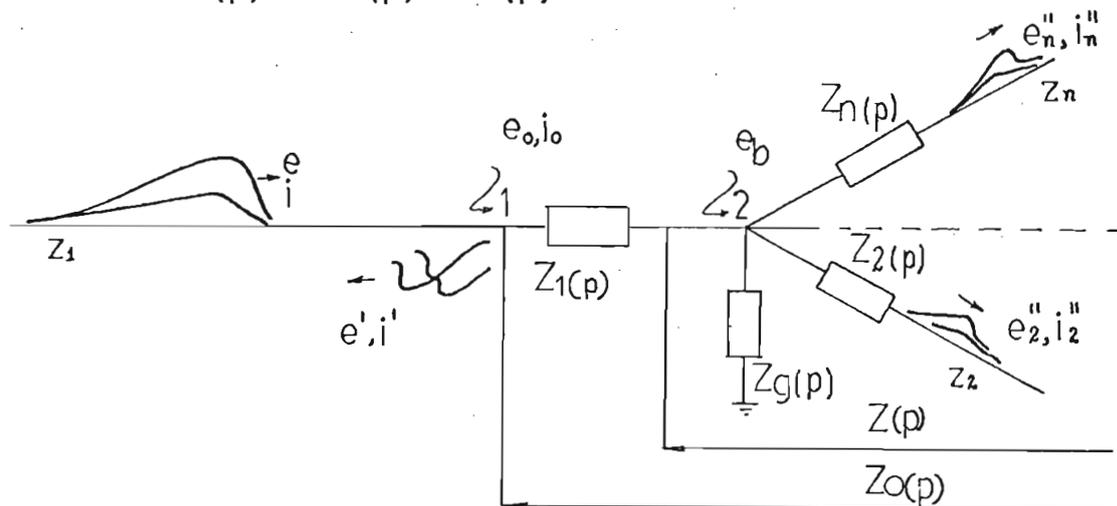


Fig. 3.5. Constitución generalizada de un Nodo.

La solución de las ecuaciones operacionales planteadas para el cálculo de las señales de voltaje y corriente, se encuentran subordinadas a la forma matemática que adquiera la señal incidente e o i , como función del tiempo. Esta solución se ve enormemente simplificada cuando la señal incidente es una función paso o función unitaria de Heaviside (la transformada de Laplace de ella es su valor dividido por el operador p) ya que no altera la constitución de estas ecuaciones^{5,7}:

$$f(p) = \frac{g(p)}{h(p)} \cdot \frac{|e|}{p} \quad (3-19)$$

que descomponiendo en fracciones parciales aparece como:

$$f(p) = \frac{a_1 + b_1 j}{p + c_1 + d_1 j} + \frac{a_1 - b_1 j}{p + c_1 - d_1 j} + \frac{a_2 + b_2 j}{p + c_2 - d_2 j} + \frac{a_2 - b_2 j}{p + c_2 - d_2 j} + \dots \quad (3-20)$$

y agrupando los términos cuyos denominadores son sus respectivas conjugadas.

$$f(p) = \frac{2a_1(p+c_1) + 2b_1 d_1}{(p+c_1)^2 + d_1^2} + \frac{2a_2(p+c_2) + 2b_2 d_2}{(p+c_2)^2 + d_2^2} + \dots \quad (3-21)$$

cuyas transformadas inversas son de la forma:

$$f_n(t) = e^{-c_n t} (2 a_n \text{ Cos } d_n \cdot t + 2 b_n \text{ Sen } d_n \cdot t) \quad (3-22)$$

logrando con ello mediante un proceso que no reviste mayores dificultades llegar a la solución en el dominio del tiempo.

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_n(t) \quad (3-23)$$

3.4. DESCOMPOSICION DE UNA ONDA DE FORMA ARBITRARIA EN FUNCIONES PASO:

Las señales incidentes, no necesariamente son una función paso sino que tienen configuraciones completamente arbitrarias como:

$$f(t) = a_1 e^{-a_2 t} + a_3 e^{-a_4 t} + a_5 \text{ Sen } \omega t + a_6 \text{ Cos } \omega t \quad (3-24)$$

donde cada coeficiente, argumento, y exponente determina una forma diferente de la onda como función del tiempo.

Es de pensar que siendo relativamente más fácil el cálculo de la respuesta de un sistema ante la presencia de una función paso incidente que ante otra forma de onda, es conveniente tratar una función arbitraria, como la superposición de ondas rectangulares infinitas, necesitando un fundamento teórico que garantice la aproximación entre las res

puestas que se obtienen al tratar a la función como tal o como funciones unitarias superpuestas.

Sea una función $f(\tau)$, Fig. 3.6., aproximada por funciones rectangulares infinitesimales. En un paso infinitesimal localizado en τ su valor es:

$$\Delta f = \frac{df}{d\tau} \Delta\tau \quad (3-25)$$

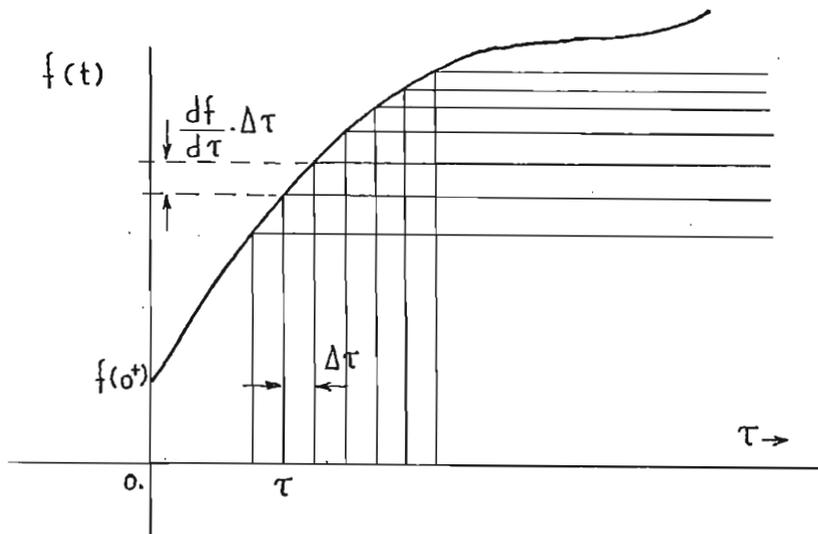


Fig. 3.6. Aproximación por funciones paso.

la respuesta del sistema a este incremento es:

$$\gamma_{\tau}(t) = \frac{df}{d\tau} \Delta\tau g(t-\tau)$$

Sumando los incrementos comprendidos entre 0^- y t dan la respuesta total

$$\gamma(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_{\tau=0}^t \gamma_{\tau}(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_{0^-}^t \frac{df}{d\tau} \Delta\tau g(t-\tau)$$

que en el límite resulta ser:

$$\gamma(t) = \int_0^t \frac{df}{d\tau} g(t-\tau) d\tau \quad (3-26)$$

que equivale a:

$$\gamma(t) = \int_{0^-}^{0^+} f'(\tau)g(t-\tau)d\tau + \int_{0^+}^t f'(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (3-27)$$

siendo $\frac{df}{d\tau}(0) = f(0^+) \cdot \delta(\tau)$

y $g(t - \tau) = g(t)$ en $\tau = 0$

se obtiene finalmente .

$$\gamma(t) = \int_{0^-}^{0^+} f(0^+)g(t) \delta(\tau)d\tau + \int_{0^+}^t f'(\tau)g(t-\tau)d\tau$$

$$\gamma(t) = f(0^+)g(t) + \int_{0^+}^t f'(\tau)g(t-\tau)d\tau \quad (3-28)$$

Esta última ecuación, es una forma de expresar la integral de superposición de ondas rectangulares discretas⁵ Por tanto, esta respuesta difiere de la solución exacta únicamente en precisión y mejorará mientras más pequeño sea el incremento de tiempo con el cual se ha descompuesto la función incidente, así:

$$f(t) = f(0) + \sum_{k=1}^n (f(k \cdot t_0) - f(k \cdot t_0 - t_0)) \quad (3-29)$$

$$n = t/t_0 \quad (3-30)$$

donde:

t_0 = incremento de tiempo

n = número de veces que t contiene a t_0

Es de notarse que la función paso Δt_k solo existe después de que el tiempo tiene un valor $t = k \cdot t_0$.

C A P I T U L O IV

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LAS PERTURBACIONES

4.1. DESCARGAS ATMOSFERICAS: Para hacer general el estudio de cualquier sistema en estado transitorio, es también necesario generalizar la forma en que las diferentes perturbaciones aportan con señales de corriente y voltaje.

Al ocurrir una descarga atmosférica en algún punto del sistema eléctrico, la carga entregada por ella, ante la resistencia eléctrica del elemento alcanzado se traduce en señales de voltaje y corriente que encuentran una impedancia nula para ingresar en el mismo; no así, cuando después de reflejarse en algún punto regresan al lugar de descarga y encuentra recuperadas las cualidades dieléctricas del medio y por tanto una impedancia infinita^{24, 19}.

Existen dos casos más probables de ocurrir:

- Caída de un rayo en una línea:

La línea se divide en dos segmentos de características semejantes a lo largo de los cuales se propagan señales de voltaje y corriente definidas por:

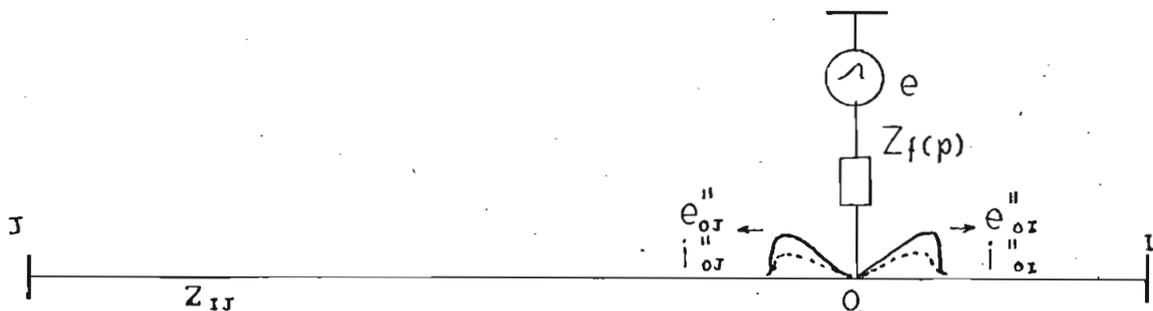


Fig. 4.1. Caída de un rayo en una línea.

$$e''_{oJ} = \frac{z_{oJ}}{z_{oJ} + Z_f(p)} \cdot e \quad e''_{oI} = \frac{z_{oI}}{z_{oI} + Z_f(p)} \cdot e$$

$$i''_{oJ} = e''_{oJ} \cdot \frac{1}{z_{oJ}} \quad i''_{oI} = e''_{oI} \cdot \frac{1}{z_{oI}} \quad (4-1)$$

y puesto que la impedancia de la fuente es nula y las impedancias características de los segmentos de línea son iguales se obtienen finalmente ondas iguales de corriente y voltaje:

$$e''_{oJ} = e''_{oI} = e \quad (4-2)$$

$$i''_{oJ} = i''_{oI} = \frac{1}{z_{IJ}} \cdot e$$

- Caída de un rayo en una barra:

En este caso, rigen iguales consideraciones respecto a la impedancia de disrupción; más, las ondas de voltaje y corriente que se propagan a lo largo de cada línea conectada a la barra, no serán siempre iguales; ya que para cada una de ellas existe un valor propio de impedancia característica y de conexión a la barra. El voltaje en la barra es:

$$e_b = \frac{Z_o(p)}{Z_o(p) + Z_f(p)} \cdot e \quad (4-3)$$

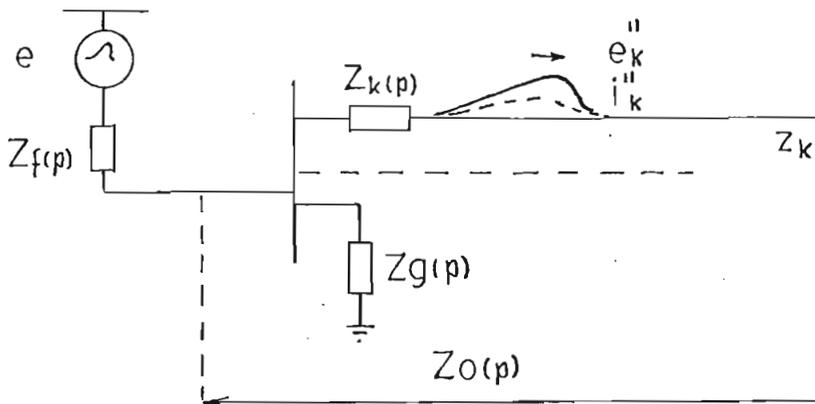


Fig. 4.2. Caída de un rayo en una barra.

Tomando en cuenta el divisor de tensión en cada línea formada por su impedancia característica y su impedancia de conexión, se llega a:

$$e_k'' = \frac{z_k}{z_{k(p)} + z_k} \cdot e_b = \frac{z_k}{z_{k(p)} + z_k} \cdot e$$

$$i_k'' = \frac{l}{z_k} \cdot e_k'' = \frac{l}{z_{k(p)} + z_k} \cdot e \quad (4-4)$$

Para ambos casos así como para los que se considerarán posteriormente, la señal proveniente de la fuente, se define dando valores a los parámetros de la ecuación (3-24), obteniendo con ello una onda de forma arbitraria en función del tiempo a partir de una misma ecuación.

4.2. DISTURBIOS POR MANIOBRAS: Principalmente se deben a:

- Maniobras de energización y
- Maniobras de desenergización

De las maniobras de energización dos casos requieren ser analizados:

- Energización de una barra:

El divisor de tensión se encuentra constituido por la impedancia de la fuente y la impedancia equivalente de la barra vista por la fuente, de allí que el voltaje en la barra y las señales en las líneas sean:

$$e_b = \frac{z_o(p)}{z_o(p) + z_f(p)} \cdot e \quad (4-5)$$

$$e_k'' = \frac{z_k}{z_{k(p)} + z_k} e_b = \frac{z_o(p)}{z_o(p) + z_f(p)} \cdot \frac{z_k}{z_{k(p)} + z_k} \cdot e$$

$$i_k'' = \frac{l}{z_k} \cdot e_k'' = \frac{z_o(p)}{z_o(p) + z_f(p)} \cdot \frac{l}{z_{k(p)} + z_k} \cdot e \quad (4-6)$$

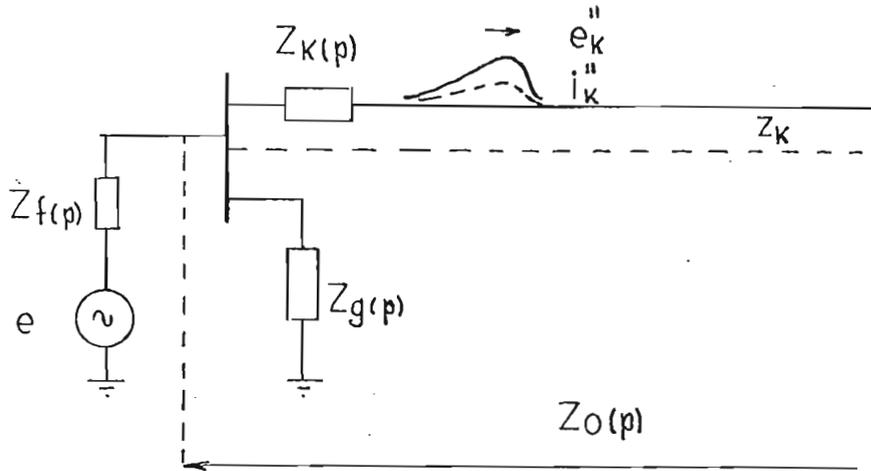


Fig. 4.3. Energización de una barra

- Energización de una línea que conecta dos sistemas.

La conexión de una línea, ocasiona una inyección de ondas de voltaje hacia ambos lados de los puntos conectados, hasta lograr la igualación de la tensión en los mismos²⁴. Las ondas de voltaje y corriente que se producen, son función de la diferencia de tensión existentes entre los puntos conectados; la misma que, actúa como una fuente en serie (motivo por el que se aparta del modelo general en el que la fuente es shunt) con las impedancias conectadas a dichos puntos y la impedancia de cierre (en el caso de utilizarse), Fig. 4.4., y éstas a su vez trabajan como divisores de tensión, luego:

$$e_I'' = \frac{Z_o(p)}{Z_o(p) + z_{IJ} + R} \cdot (-e_{12}) \quad (4-7)$$

$$e_J'' = \frac{z_{IJ}}{Z_o(p) + z_{IJ} + R} \cdot e_{12} \quad (4-8)$$

$$e_R = \frac{R}{Z_o(p) + z_{IJ} + R} \cdot e_{12} \quad (4-9)$$

$$I_{IJ}'' = \frac{1}{Z_o(p) + z_{IJ} + R} \cdot e_{12} \quad (4-10)$$

001747

Cuando ocurre el cierre de S_2 (después de S_1) Fig. 4.4. (b), los voltajes inyectados y la nueva corriente que fluye en ambas direcciones, pasan a ser función de la caída existente en R:

$$e_I'' = \frac{Z_o(p)}{Z_o(p) + z_{IJ}} \cdot (-e_R) \quad (4-11)$$

$$e_J'' = \frac{z_{IJ}}{Z_o(p) + z_{IJ}} \cdot (e_R) \quad (4-12)$$

$$I_{IJ}' = \frac{1}{Z_o(p) + z_{IJ}} \cdot (e_R) \quad (4-13)$$

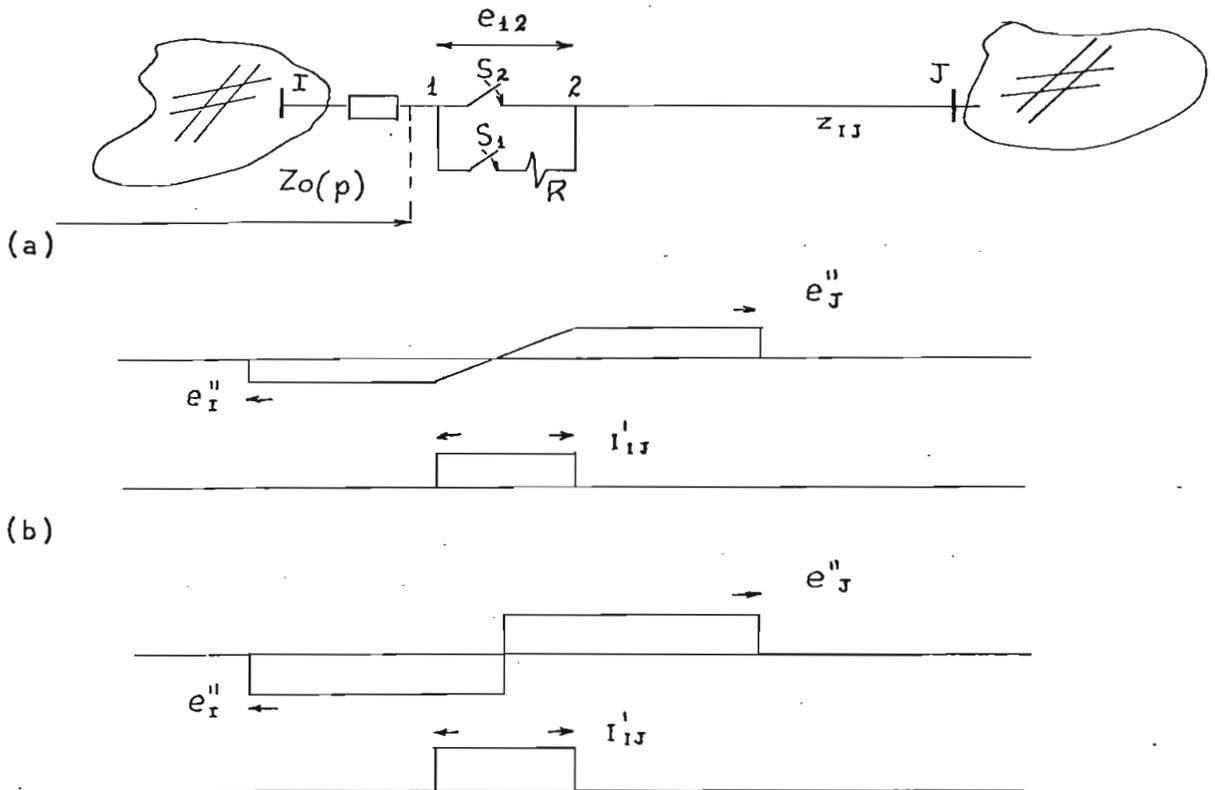


Fig. 4.4. Energización de una línea que une dos sistemas (voltaje paso).

Si el cierre de S_2 ha sido realizado directamente sin efectuar antes el de S_1 (Cierre sin resistencia), en las ecuaciones (4-11), (4-12) y (4-13) e_R toma el valor de e_{12} .

Al tratar con maniobras de desenergización, en general el efecto que ocasionan dentro de un sistema al interrumpir un camino eléctrico, es la creación de ondas de voltaje que viajan en todas las direcciones posibles con un valor igual y de signo cambiado al existente antes de la maniobra hacia la carga y con valor igual e igual signo hacia la fuente, Fig.4.5., por lo tanto mediante el modelo general empleado y analizado en el caso de las descargas atmosféricas, se tratarán estas señales. Es necesario aclarar que, las ondas se originan hacia el lado de la fuente, porque la señal

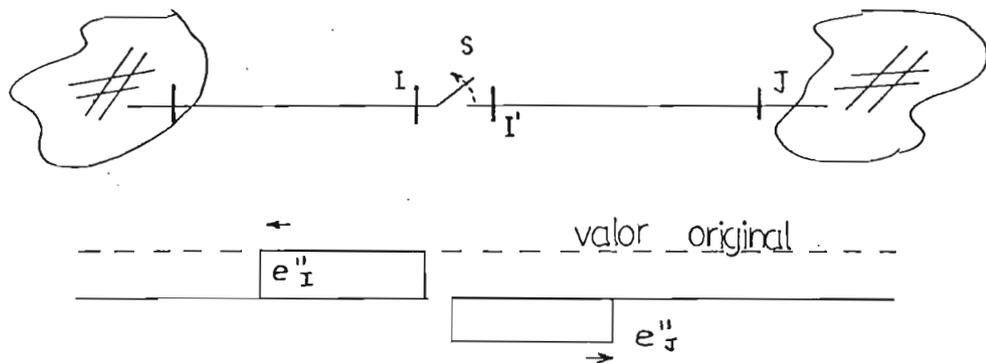


Fig. 4.5. Apertura de una línea (voltaje paso).

original encuentra un punto discontinuo con un coeficiente de reflexión igual a 1 y en dirección a la carga, porque - la ausencia de la señal original, equivale a superponer so bre ésta, una onda igual y de signo opuesto que la anule. La configuración del circuito, ha variado con el aumento - de un nodo, en el que se incerta la fuente representativa de la señal hacia la carga.

4.3. DISTURBIOS POR FALLA: Un sistema está sujeto a fa- llas de roturas de conducto- res, cortocircuito y posibles combinaciones de estas.

La rotura de conductores, puede ser analizada como se

hizo con los disturbios por maniobras de desenergización, - creando dos nodos adicionales sobre el sistema original, en los que se colocarán las fuentes respectivas.

Al considerar el caso de un corto-circuito, puesto que el efecto en el sistema es el de una fuente que proporcionaría una tensión igual y opuesta a la original, Fig. 4.6., se emplea el modelo general de la fuente paralelo, con una impedancia de fuente resistiva y cuyo valor puede ser cero o no, según sea un cortocircuito metálico o no. Las ecuaciones (4-5) y (4-6), se transforman a:

$$e_b = \frac{Z_o(p)}{Z_o(p) + R} \cdot e \quad (4-14)$$

$$e_k'' = \frac{Z_o(p)}{Z_o(p) + R} \cdot \frac{z_k}{Z_k(p) + z_k} \cdot e$$

$$i_k'' = \frac{Z_o(p)}{Z_o(p) + R} \cdot \frac{1}{Z_k(p) + z_k} \cdot e \quad (4-15)$$

y el valor de la impedancia de la fuente permanece invariable a lo largo del estudio.

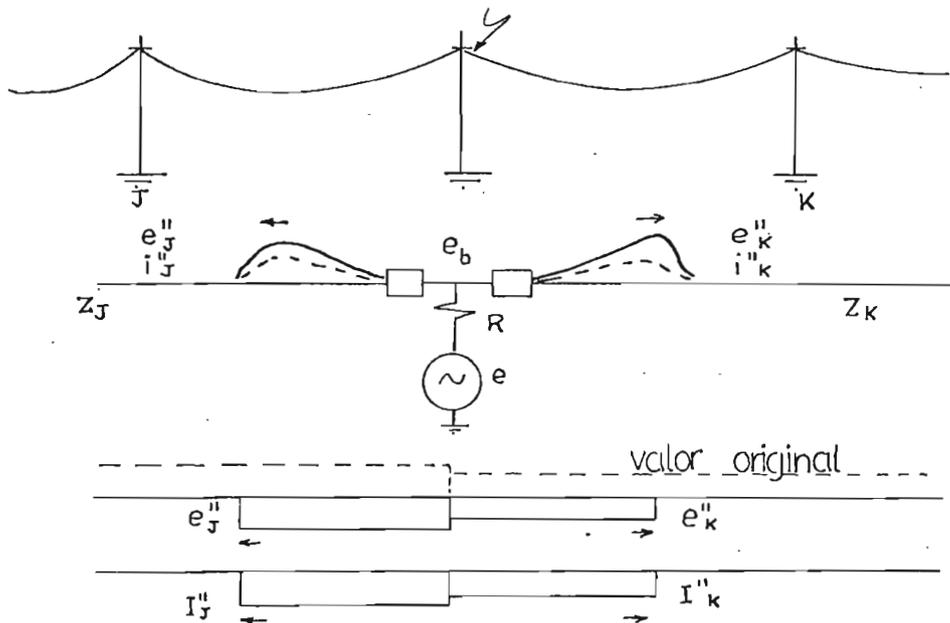


Fig. 4.6. Representación de un cortocircuito (Voltaje paso).

En los casos de energización y fallas, es necesario superponer los valores de las fuentes representativas a los existentes en cada punto, antes del sistema para encontrar la verdadera magnitud de cada señal, no así en el caso de las descargas atmosféricas, donde los valores originales, son despreciables frente a los provenientes del disturbio.

C A P I T U L O V

PROGRAMA DIGITAL PARA EL CALCULO DE VOLTAJES Y CORRIENTES TRANSITORIOS.

5.1. INTRODUCCION: El programa digital que resume los procesos repetitivos y los cálculos necesarios para averiguar la magnitud y forma de las señales de voltaje y corriente a lo largo del tiempo, mediante la técnica del enrejado descrita en el punto 1.5, y complementada por el método de descomposición de ondas decrito en el capítulo III, conforma un algoritmo de procesamiento que puede resumirse así:

A un tiempo determinado, se van tomando una a una las barras existentes en el sistema, en cada una de ellas se calculan las señales que originan aquellas que a este tiempo estuvieren llegando a esta barra y se superponen para encontrar las magnitudes de corriente y voltaje a los que se encuentran sometidos los elementos de dicha barra. Una vez terminado el tratamiento de todas las barras, se escribe únicamente el valor del voltaje que soporta la barra y las corrientes en cada línea, para después de incrementar la escala del tiempo en una unidad volver a repetir el mismo proceso.

5.2. PROGRAMA PRINCIPAL Y SUBROUTINAS: El programa digital, consta de un programa principal, doce subrutinas de cálculo y cinco subrutinas auxiliares para anular la memoria rotativa y los arreglos auxiliares utilizados a lo largo de todo el programa^{9, 10}.

Programa principal: Contiene formatos de entrada y salida, instrucciones para almacenamiento de datos y recuperación de resultados, en ge

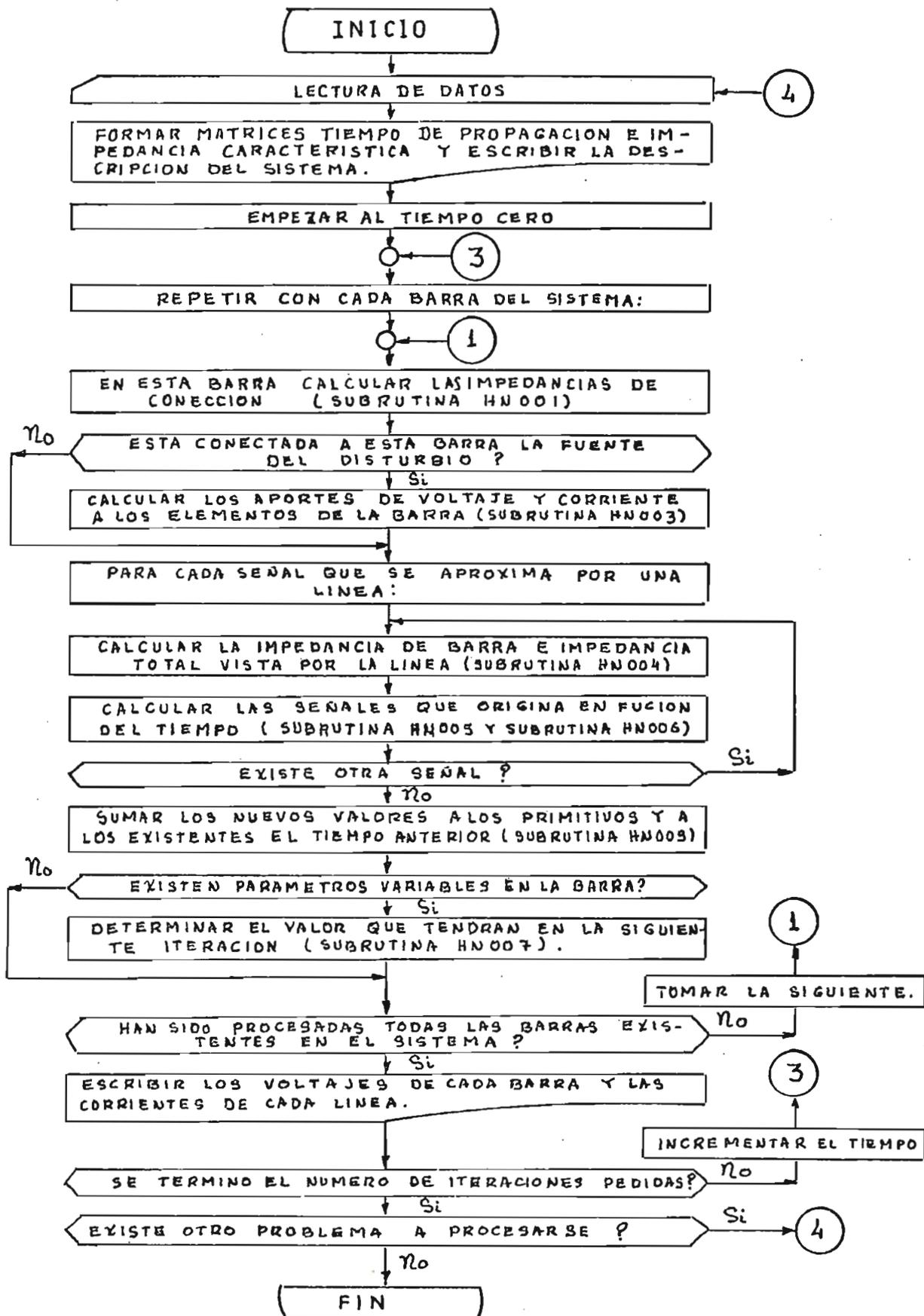


Fig. 5.1. Cálculo de magnitudes transitorias.

neral resume el algoritmo de cálculo como lo indica la Figura 5.1.

Subrutina HN001: Calcula las impedancias equivalentes de conexión línea nodo para todas las líneas conectadas a una barra y la impedancia de conexión línea-tierra para la misma barra adoptando como modelo una impedancia compuesta por cuatro ramas en paralelo con valores de resistencia, inductancia y capacitancia expresándolas en el dominio de la frecuencia.

Subrutina HN002: Determina la posición de un valor dentro de la memoria rotativa, a partir de las unidades de tiempo existentes en la escala del tiempo.

Subrutina HN003: Esta subrutina entrega al programa principal las magnitudes de voltaje y corriente aportadas a los elementos de una barra por una fuente shunt conectada a la misma. Estas señales, son función del incremento de voltajes y cumplen con las relaciones anotadas como (4-5) y (4-6).

Subrutina HN004: Determina la impedancia equivalente de una barra vista por una línea (ecuación (3-17)) y la impedancia total vista por la misma línea (ecuación (3-18)), en el dominio de la frecuencia.

Subrutina HN005: Encuentra la magnitud de las señales reflejadas y transmitidas cuando la discontinuidad está constituida por parámetros pura-

mente resistivos, mediante el reemplazo de las impedancias equivalentes en las ecuaciones (3-8) siendo este el único caso en el que no aparecen como función de la frecuencia.

Subrutina HN006: Esta subrutina mediante las mismas ecuaciones (3-8) conforma las ecuaciones que regirán la magnitud y forma de las ondas reflejadas y transmitidas en el dominio del tiempo, y se emplea en las discontinuidades cuyos parámetros dejan de ser puramente resistivos.

Subrutina HN007: Esta subrutina se utiliza únicamente cuando en la discontinuidad existen parámetros cuyo valor no es constante y se destina a averiguar el valor de éste ante las magnitudes instantáneas de voltaje y corriente a la que se encuentran sometidos de acuerdo con las ecuaciones (2-15) y (2-16).

Subrutina HN008: Mediante las ecuaciones numeradas como (3-19) al (3-23), calcula el valor de las soluciones a las ecuaciones diferenciales como función del tiempo incluyendo a la función paso de la que provienen.

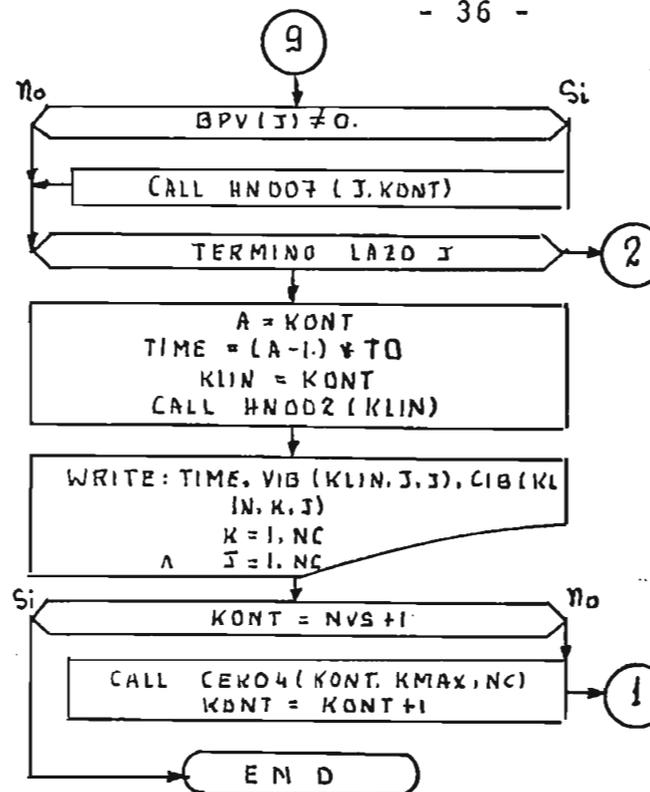
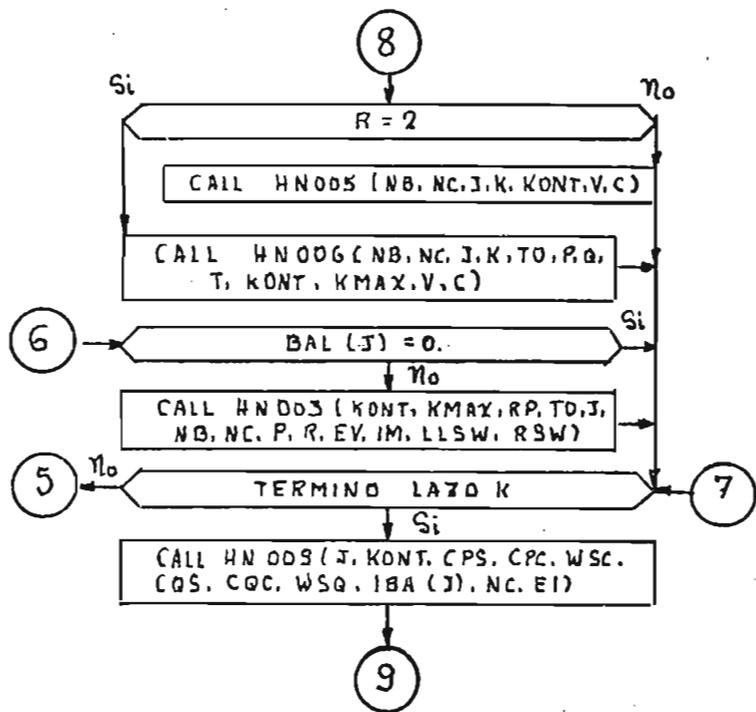
Subrutina HN009: Superpone en los valores a escribirse dos tipos de señales, la primera que es aquella proveniente de las reflexiones sucesivas de las ondas y la segunda los valores primitivos de las señales de voltaje existentes antes de ocurrir la perturbación.

Subrutina HN010: El trabajo de esta subrutina es recoger los

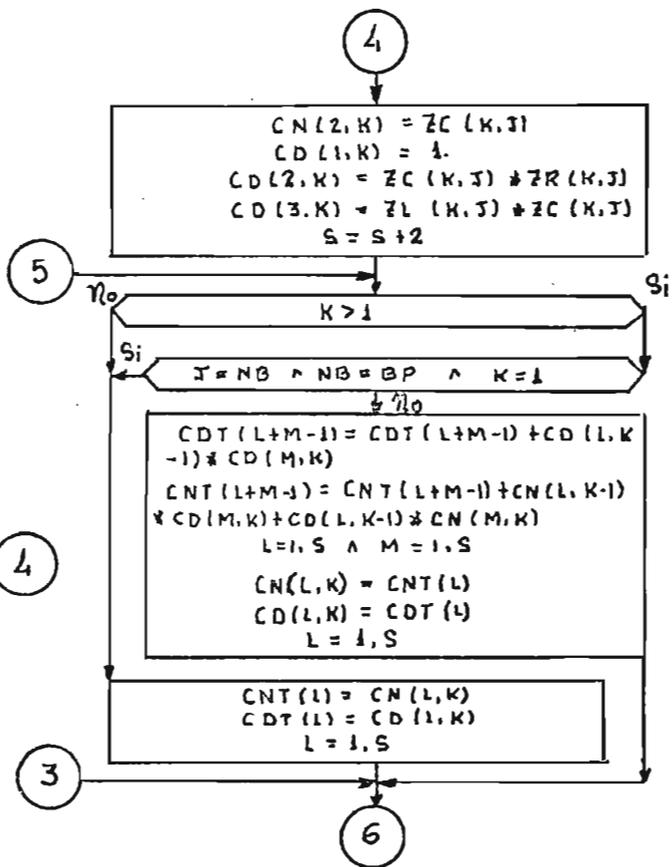
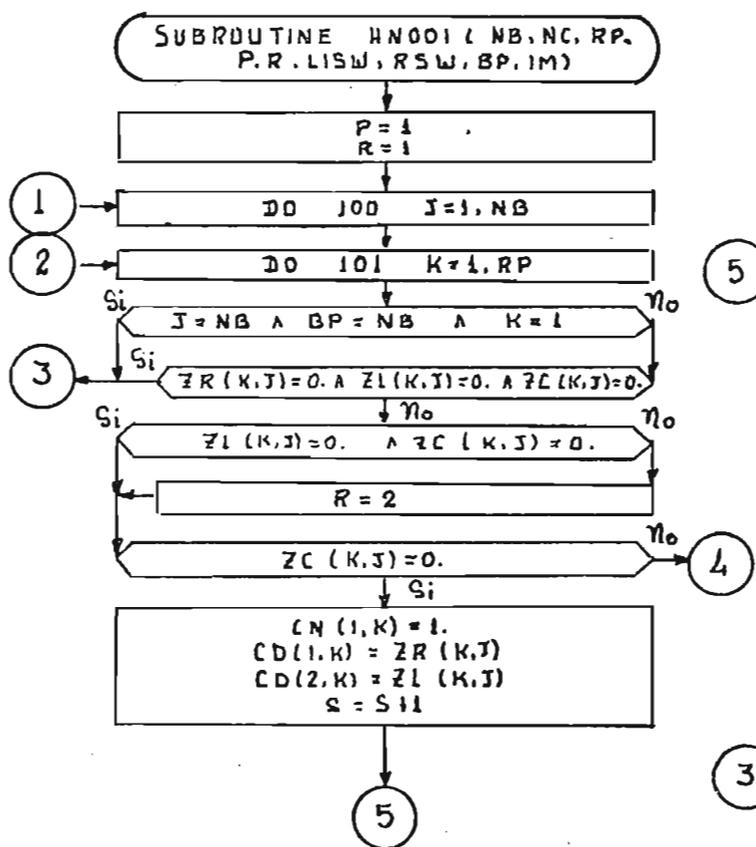
valores de los incrementos rectangulares de los incrementos rectangulares producto de la descomposición en el tiempo de las señales en forma de onda, para superponerlos y conformar las funciones rectangulares o paso que se someten al tratamiento en el enrejado.

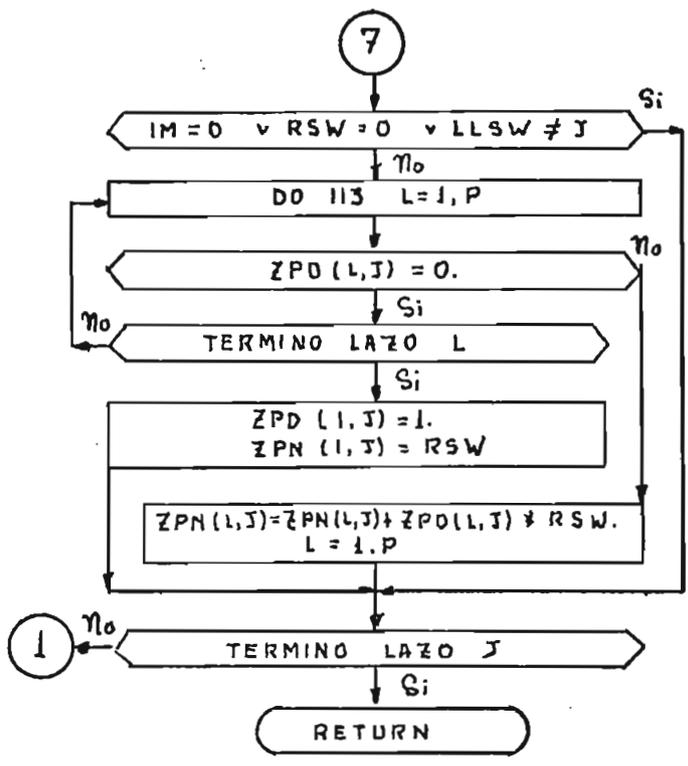
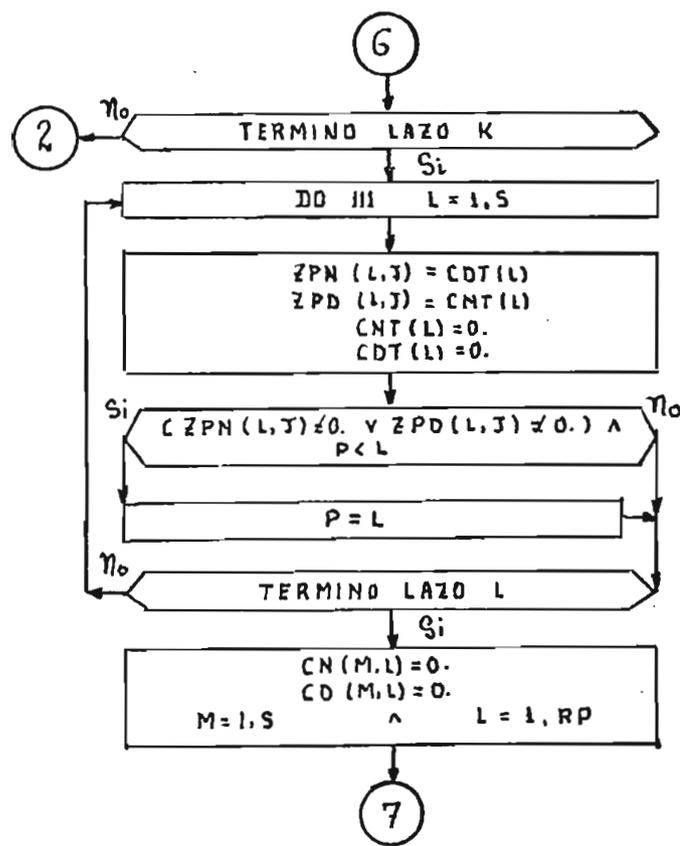
- Subrutina HN011: Esta subrutina asume el único caso particular que se aparta del modelo de la fuente shunt, para tratar una fuente serie - describe en el numeral 4.2. y utilizando el mismo proceso de establecer ecuaciones diferenciales (4-7) a la (4-13) y encontrar la solución de éstas como función - del tiempo, entrega al programa principal al aporte del incrementos rectangulares - provenientes de la conexión de dos puntos que se encuentran a diferente tensión.
- Subrutina DPRP01: Es una subrutina tomada de la memoria del computador, que se lo utiliza para evaluar los denominadores de las ecuaciones diferenciales para su descomposición en fracciones parciales (ecuación (3-20) y (3-21) y se encuentra formando parte de la subrutina HN008.

Las subrutinas auxiliares, se destinan a anular los valores con que se cargan las variables y arreglos auxiliares así como las partes de memoria rotativa que requiere ser utilizada con nuevas informaciones. Su división en subrutinas obedece a la necesidad de optimizar el tiempo de procesamiento.

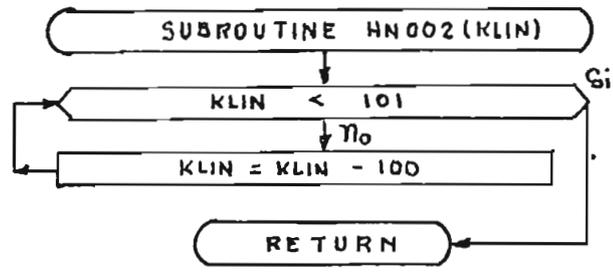


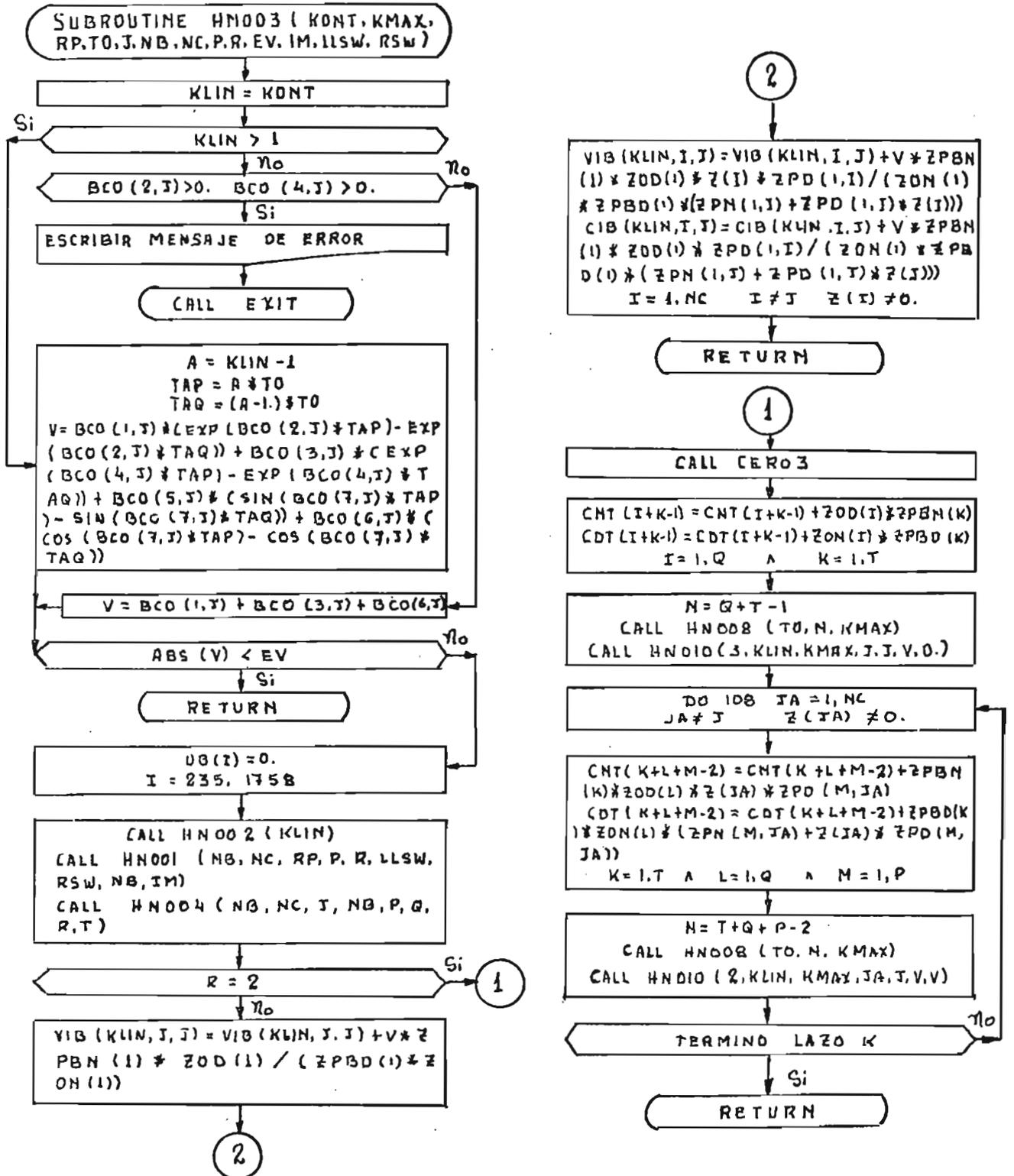
SUB RUTINA HNOO1



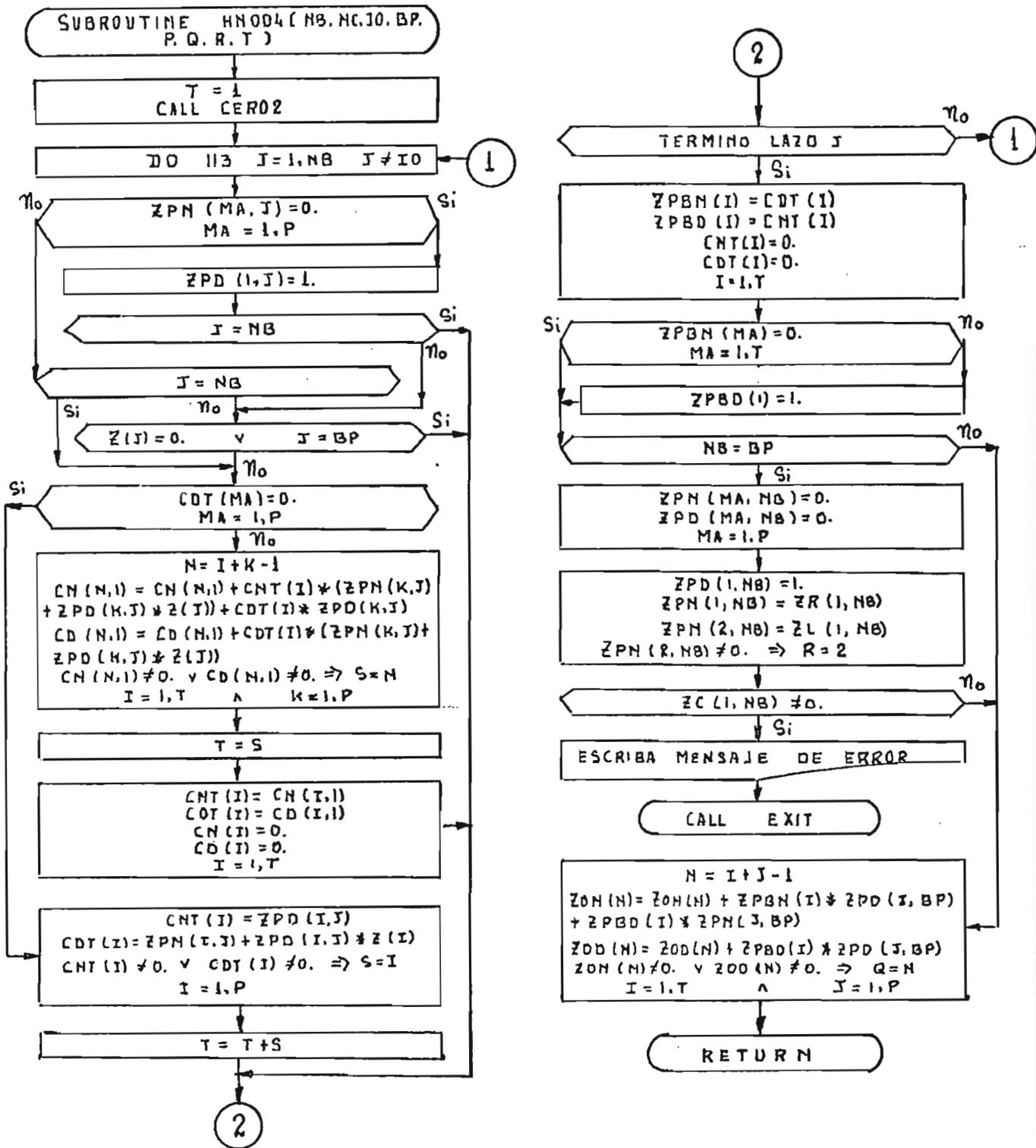


SUBROUTINA HN002

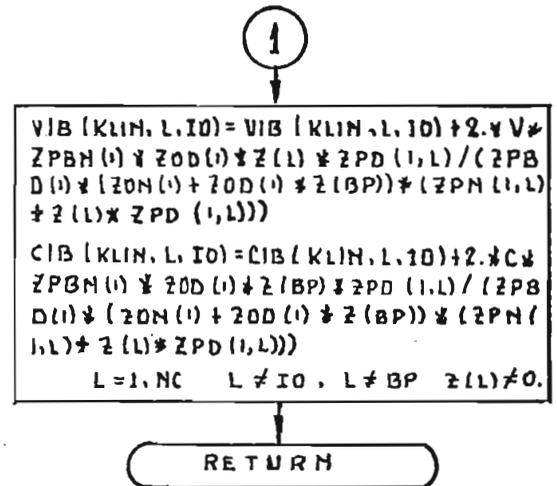
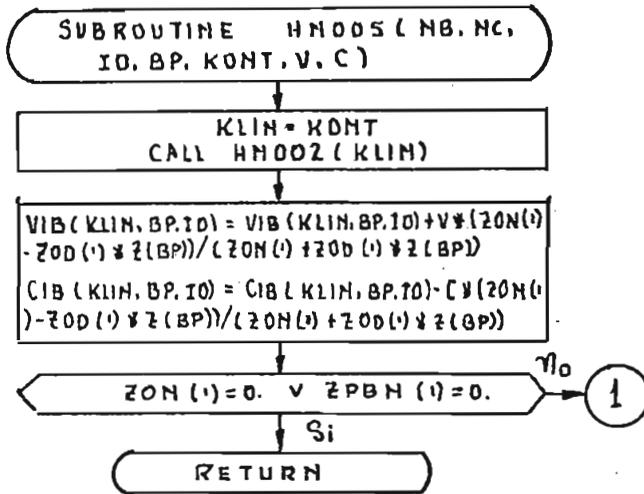




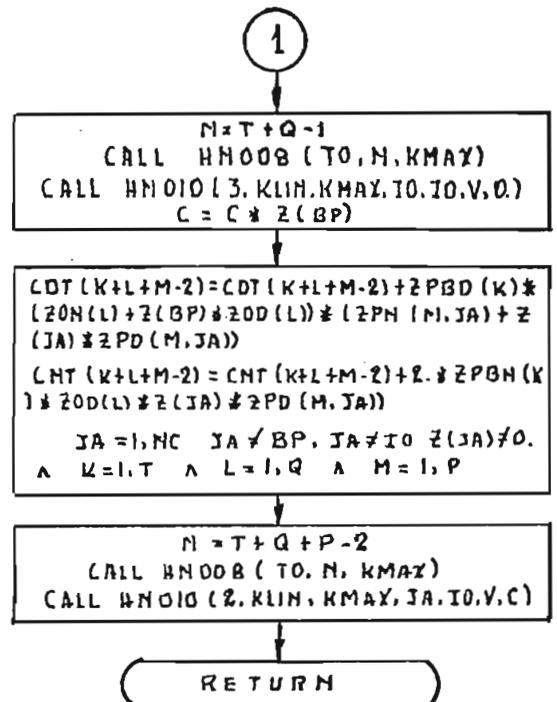
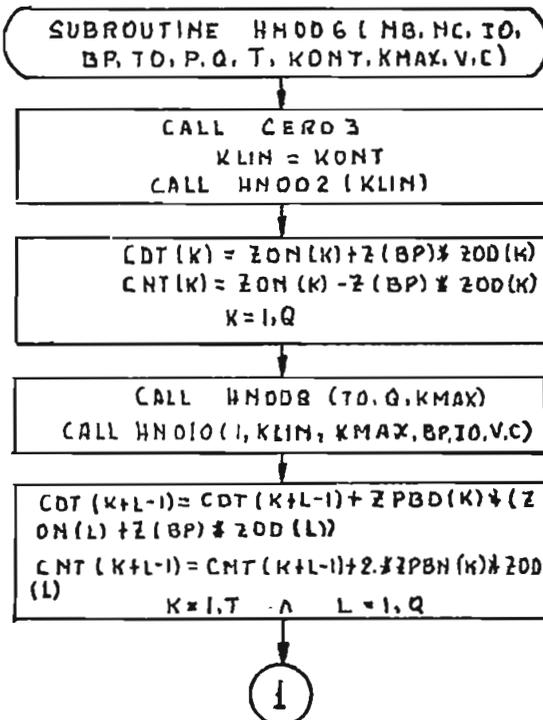
SUBROUTINA HN 004



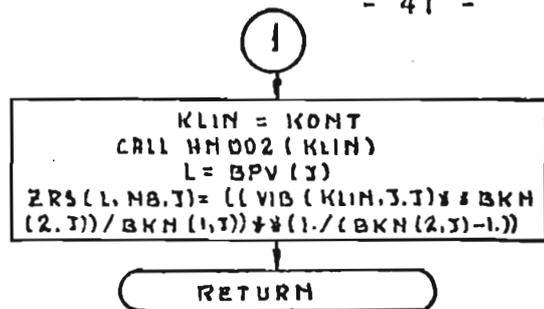
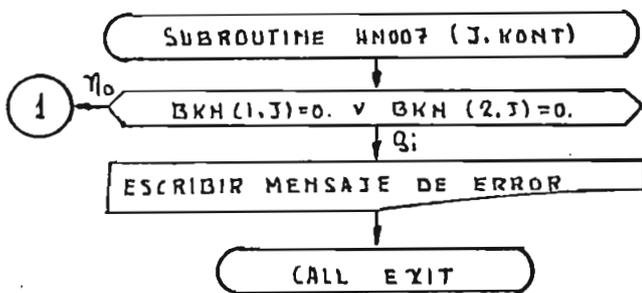
SUBROUTINA HN 005



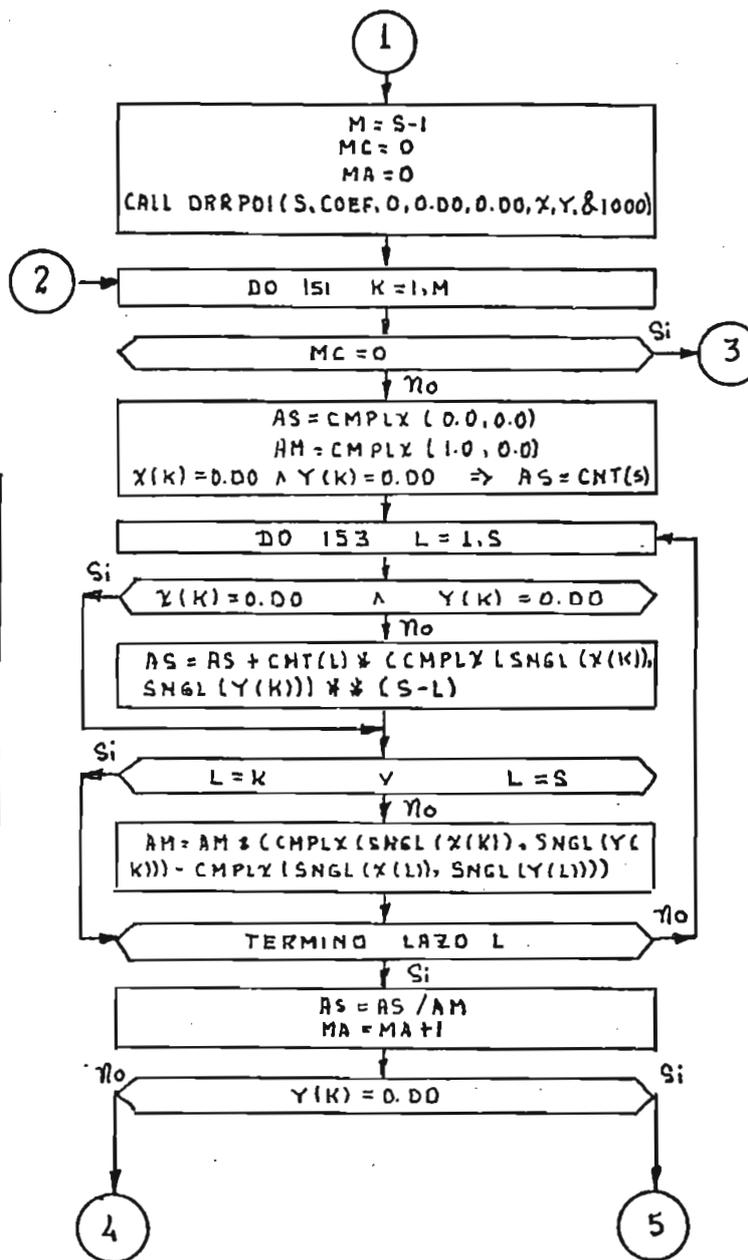
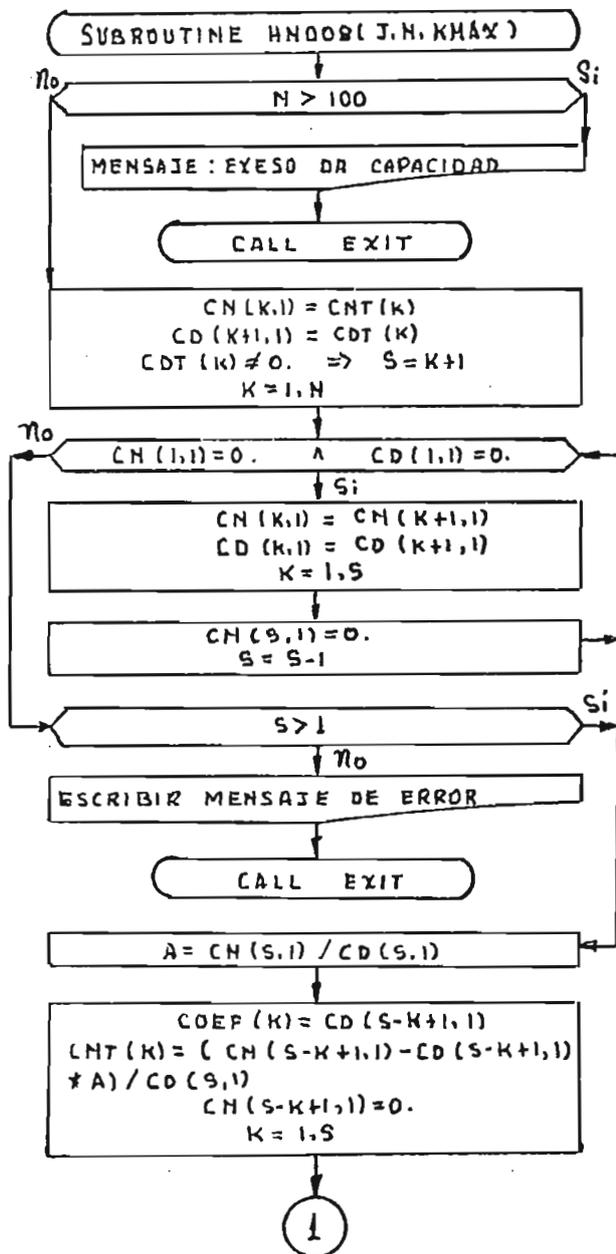
SUBROUTINA HN 006

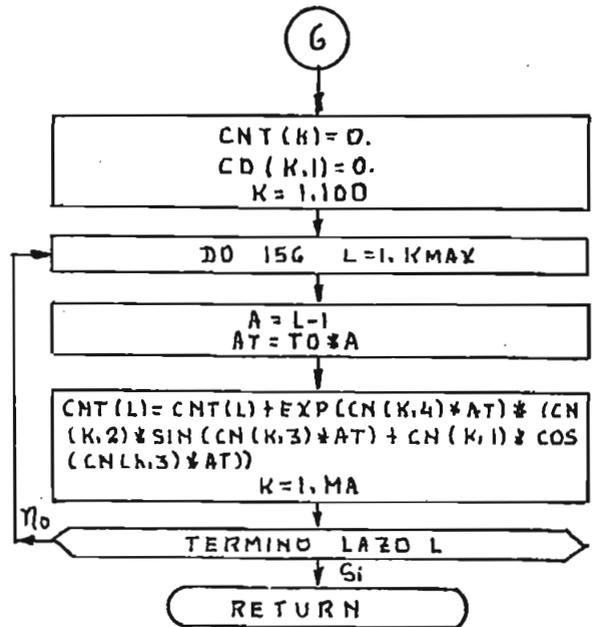
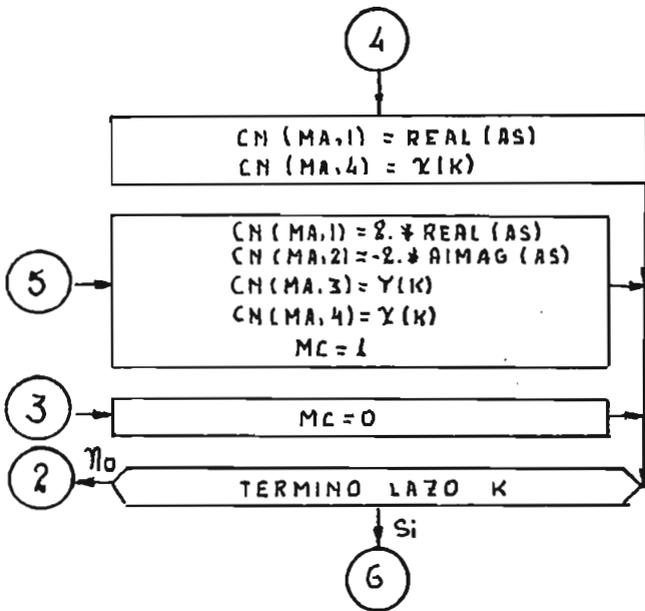


SUBROUTINA HN 007

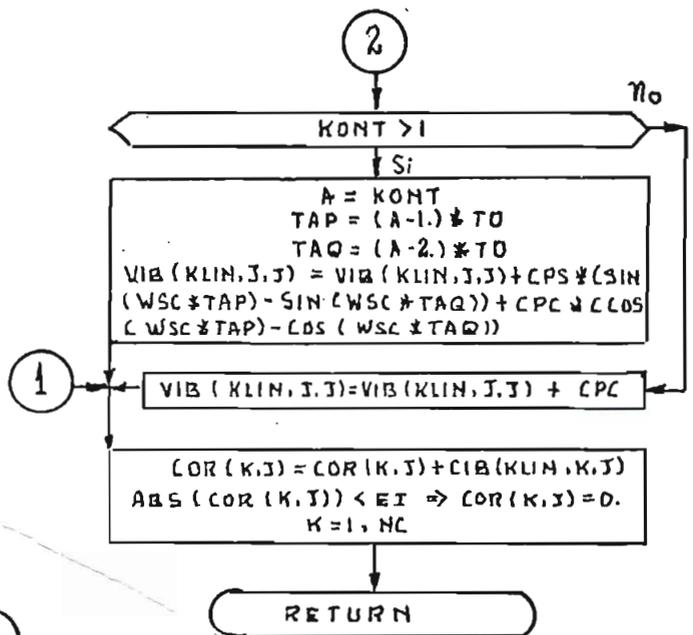
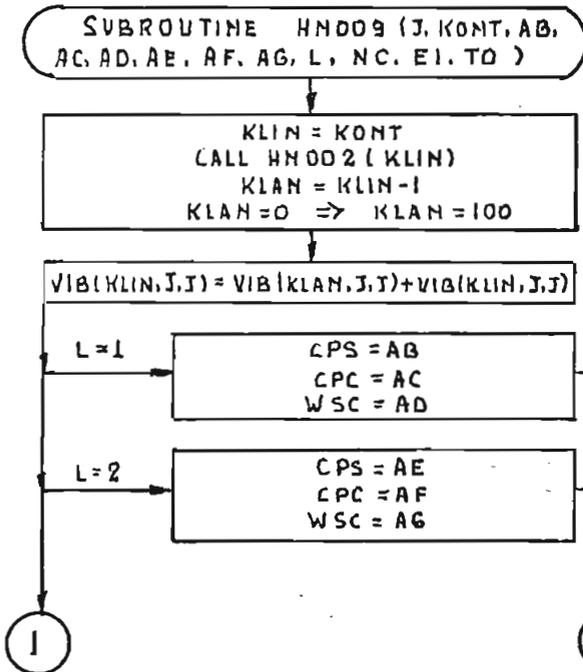


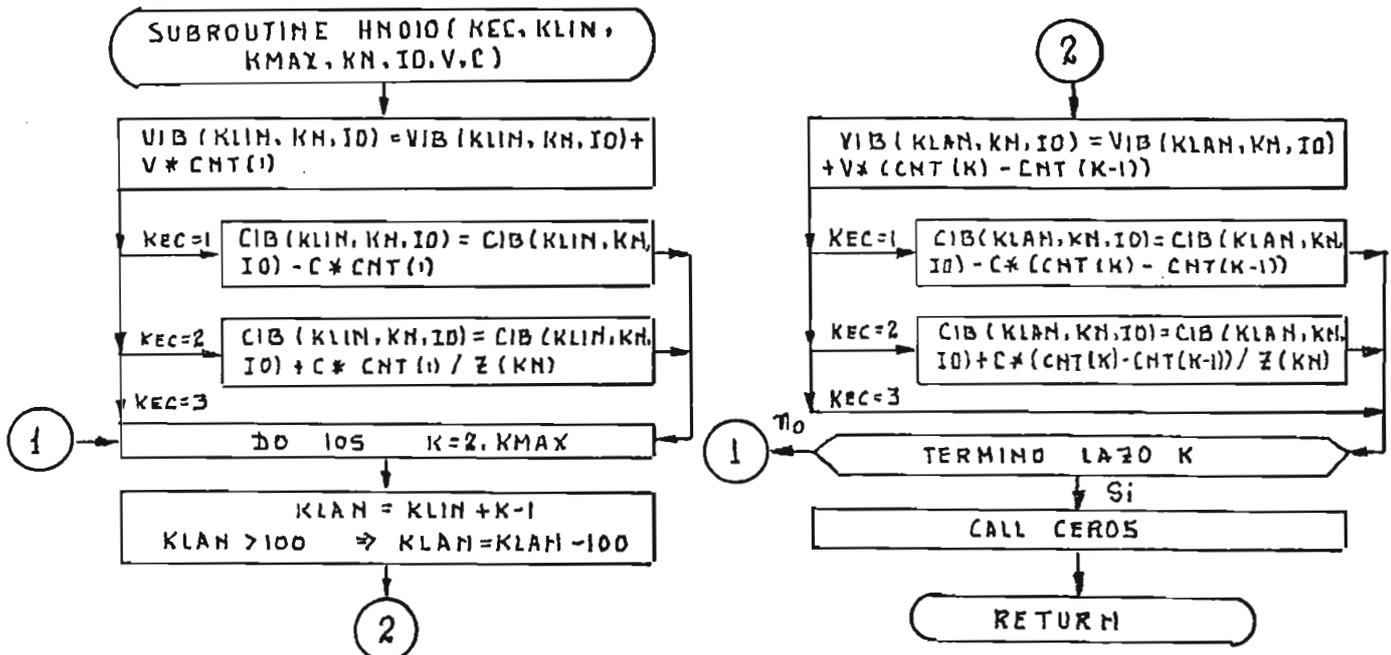
SUBROUTINA HN 008



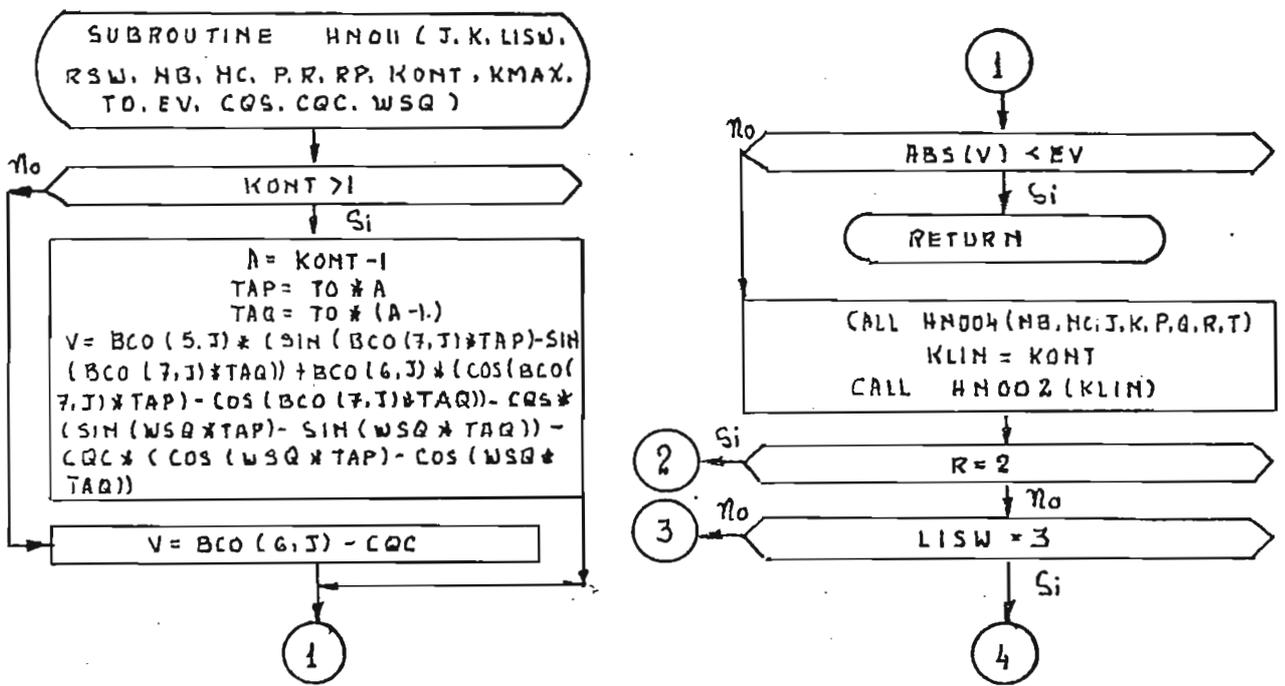


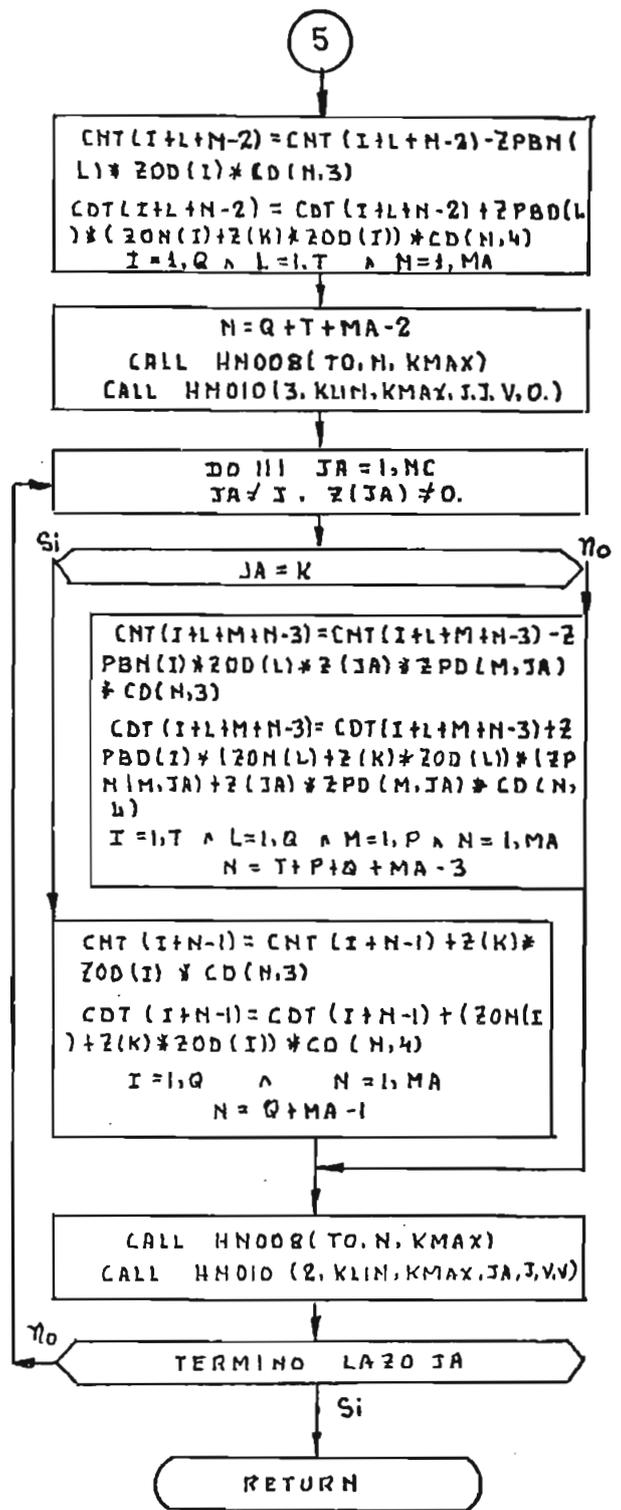
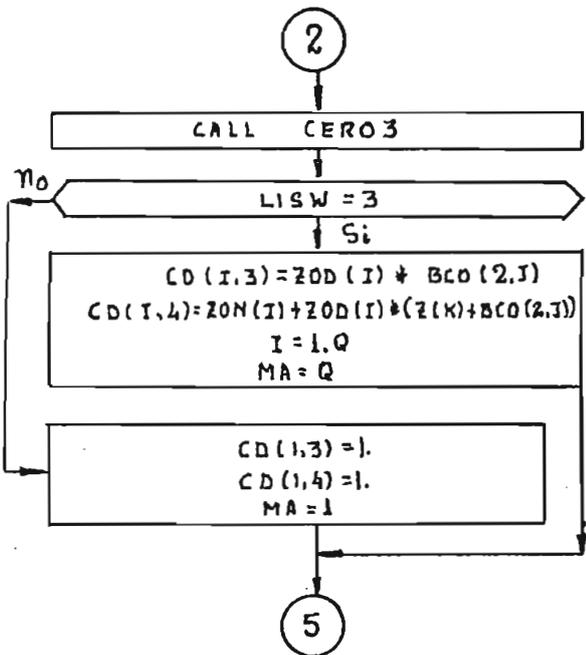
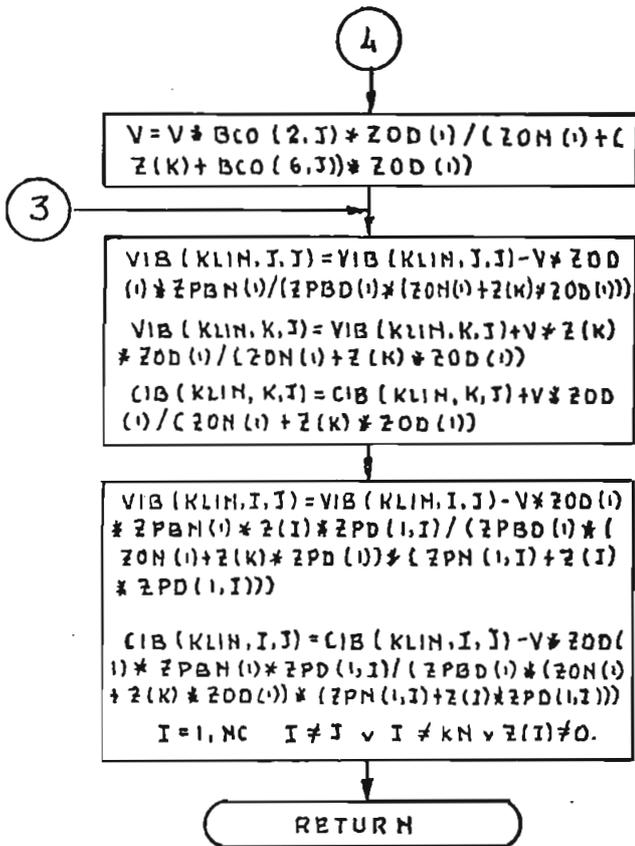
SUBROUTINA HN 009





SUBROUTINA HN 011





5.4. DATOS DE ENTRADA Y RESULTADOS.

5.4.1. Datos generales sobre el sistema: Después de haber esquematizado la representación de un fenómeno transitorio, Cap. IV, es necesario codificar los datos de acuerdo al manual respectivo (A péndice II), la información básica requerida es de:

- 1) Líneas: Impedancia característica, tiempo de propagación y atenuación en cada una de ellas.
- 2) Parámetros concentrados: Es necesario a más de los parámetros propios del sistema incluir aquellos que se utilice para representar los diferentes tipos de fenómenos analizados.
- 3) Condiciones originales de voltaje en el sistema: El programa, asume que antes de ocurrir el fenómeno, en el sistema o en las partes del sistema para el caso de la conexión de dos puntos a diferente tensión, existen condiciones primitivas de voltaje de la forma:

$$e = a_5 \text{ Sen } \omega t + a_6 \text{ cos } \omega t \quad (5-1)$$

Debiéndose definir los coeficientes y el argumento de la expresión ya que de lo contrario - el programa asume la no existencia de voltaje primitivo.

- 4) Parámetros variables: Las constantes K y n de las ecuaciones (2-15) y (2-16) deben ser definidas en el caso de que existan parámetros variables - ya que el programa calcula la variación de estos a partir de las mencionadas relaciones.

Estos datos al mismo tiempo de utilizarse con la definición de su propio valor, son utilizados por el programa -

para optimizar el uso de los campos de memoria destinados al sistema más general posible.

5.4.2. DATOS PARTICULARES SOBRE LA PERTURBACION: Mediante la asignación de valores a los parámetros de la ecuación (3-24), que son los que utiliza el programa, se deben representar las señales de voltaje provenientes de la fuente que simula el origen del fenómeno.

5.4.3. RESULTADOS DE SALIDA: Existe un formato único de salida y consta de:

- a) Encabezado y descripción del sistema, en el que aparecen los datos de entrada y los comentarios entregados al programa, con un orden que facilita la comprensión del problema.
- b) Mensajes de error: únicamente aparecen cuando el programa ha sido concluido por incompatibilidad de los datos de entrada y trata de especificar la causa de esta incompatibilidad.
- c) Resultados numéricos: Son agrupados en tres columnas, la primera contiene los voltajes en las barras y las dos segundas expresan la corriente que una línea soporta en cada extremo. Estos grupos de valores están acompañados por la escala de tiempo y subíndices que indican las barras de referencia, estando expresados: el tiempo en segundos, el voltaje en voltios y la corriente en amperios.

CALCULO DIGITAL DE VOLTAJES Y CORRIENTES TRANSITORIOS

TESIS DE GRADO ENTREGADA A LA COMISION DEL TITULO EN INGENIERIA ELECTRICA DEL IZAPALCO

MELOVANK BATHIJON MORA DE LA TORRE
AGOSTO DE 1977

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

EFECTO DE LA LONGITUD EN SEMEJANZAS TRANSITORIAS

ORIGEN DEL FENOMENO :

ENERGIZACION DEL SISTEMA POR LA CERRACION DE UNA FUENTE EN LA LINEA :

DESCRIPCION DEL SISTEMA :

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LAS LINEAS

LINEA	RESISTENCIA CAPACITIVA (OHMS)	INDUCTANCIA (HENRYS)	REACTANCIA CAPACITIVA (OHMS)	REACTANCIA INDUCTIVA (OHMS)
1 - 2	0.1000E-02	0.2000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00

CARACTERISTICAS ELECTRICAS DE LOS COMPONENTES CONECTADOS

MODE	TIPO	RESISTENCIA (OHMS)	INDUCTANCIA (HENRYS)	CAPACITANCIA (FARADS)
1	1	0.0	0.0000E+00	0.0
2	1	0.1000E-10	0.0	0.0

CONDICIONES DE CIERRE EN EL TIEMPO

TIEMPO DE CIERRE EN SEGUNDOS

ESTADO DEL INTERRUPTOR EN EL TIEMPO ORIGINAL

Fig. 5.2.(a) Formato de salida: Encabezado

C A P I T U L O VI

APLICACIONES:

El programa digital para el cálculo de voltajes y corrientes transitorios que se desarrolla en la presente tesis, constituye una herramienta de investigación de múltiples aplicaciones, ya que la información que mediante su empleo se obtiene, puede ser usada como bases de diseño, y dimensionamiento, criterio de selección etc.

A manera de ejemplo se analizará la influencia de los diferentes factores que intervienen en la energización de una línea. Como modelo se utilizará el representado en la Fig. 6.1.

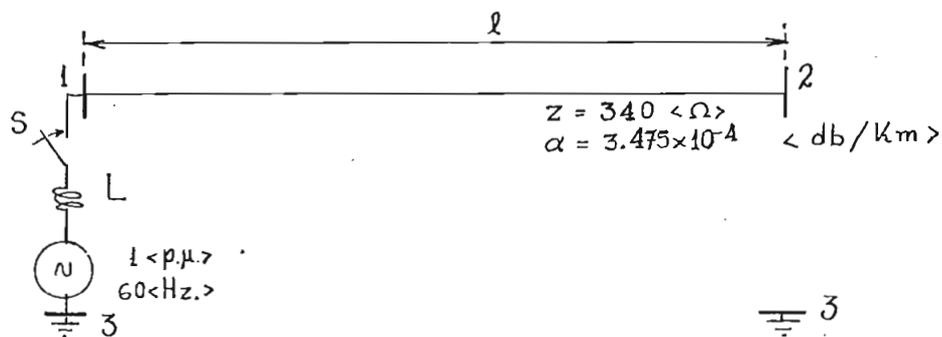


Fig. 6.1. Energización de una línea.

6.1. ANGULO DE CIERRE: El ángulo que posee la señal de voltaje el instante de energizar una línea, incide directamente sobre la magnitud de la sobretensión y corriente transitoria que se producen en el sistema, Figs. 6.2. (1 - 3), encontrándose más crítico el caso en el que la energización se efectúa cuando el voltaje posee su máximo valor 90° , en este caso se observan mayores magnitudes de voltaje y corriente transitorios y va-

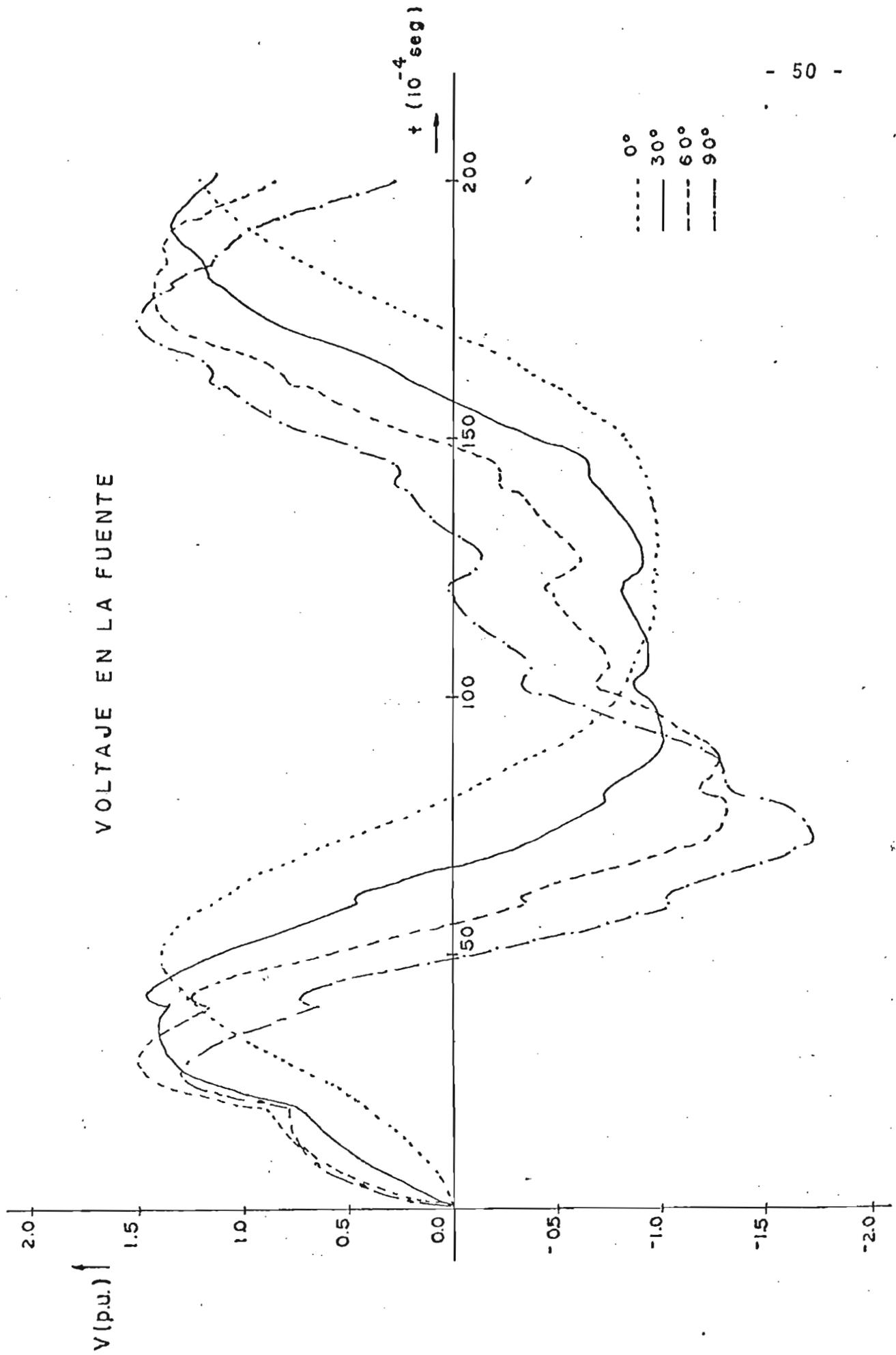


FIG. 62.1 EFECTOS DEL DEFASAMIENTO DE VOLTAJE EN LA ENERGIZACION DE UNA LINEA

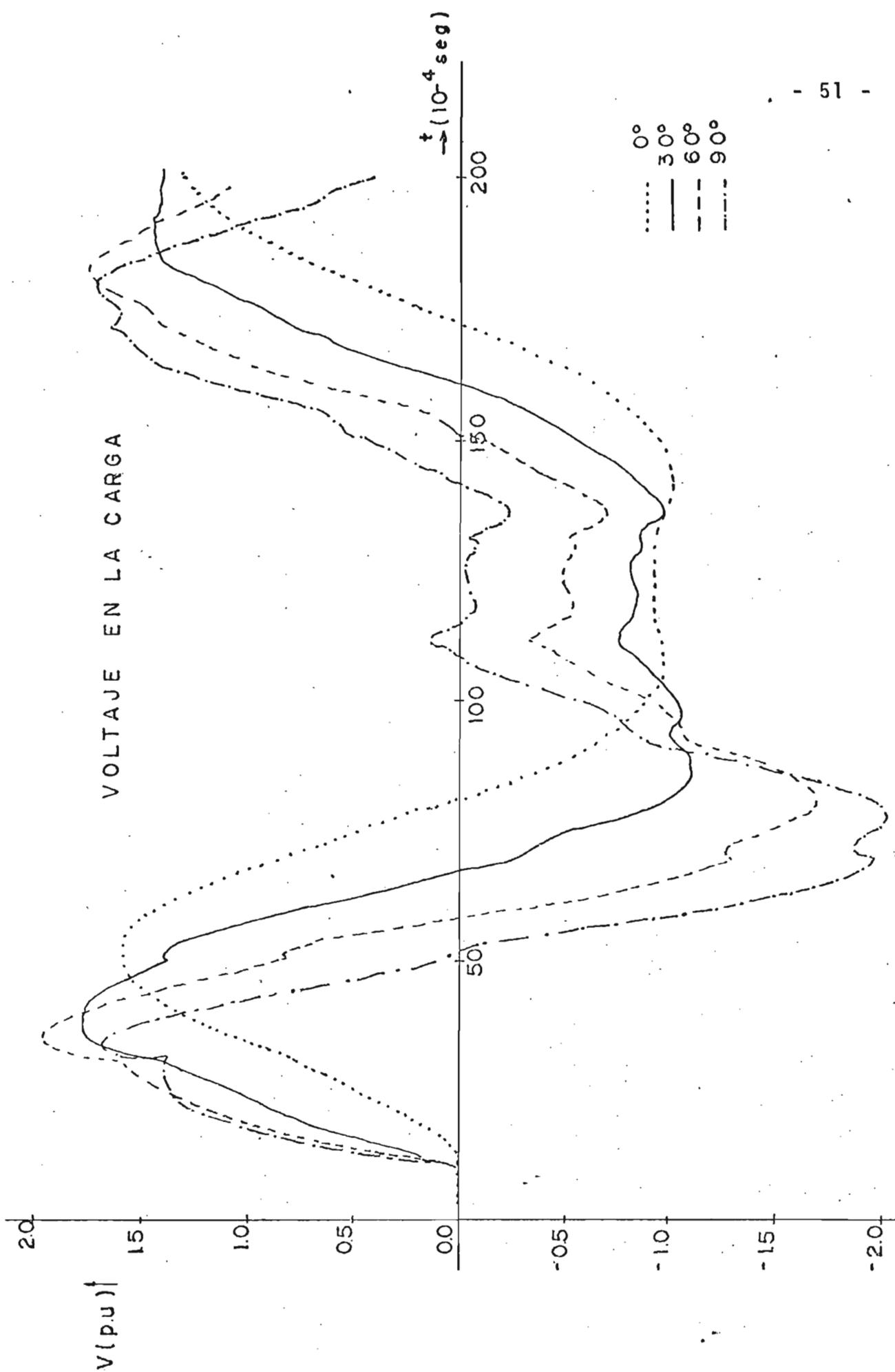


FIG 6.22 EFECTO DEL DEFASAMIENTO DE VOLTAJE EN LA ENERGIZACION DE UNA LINEA

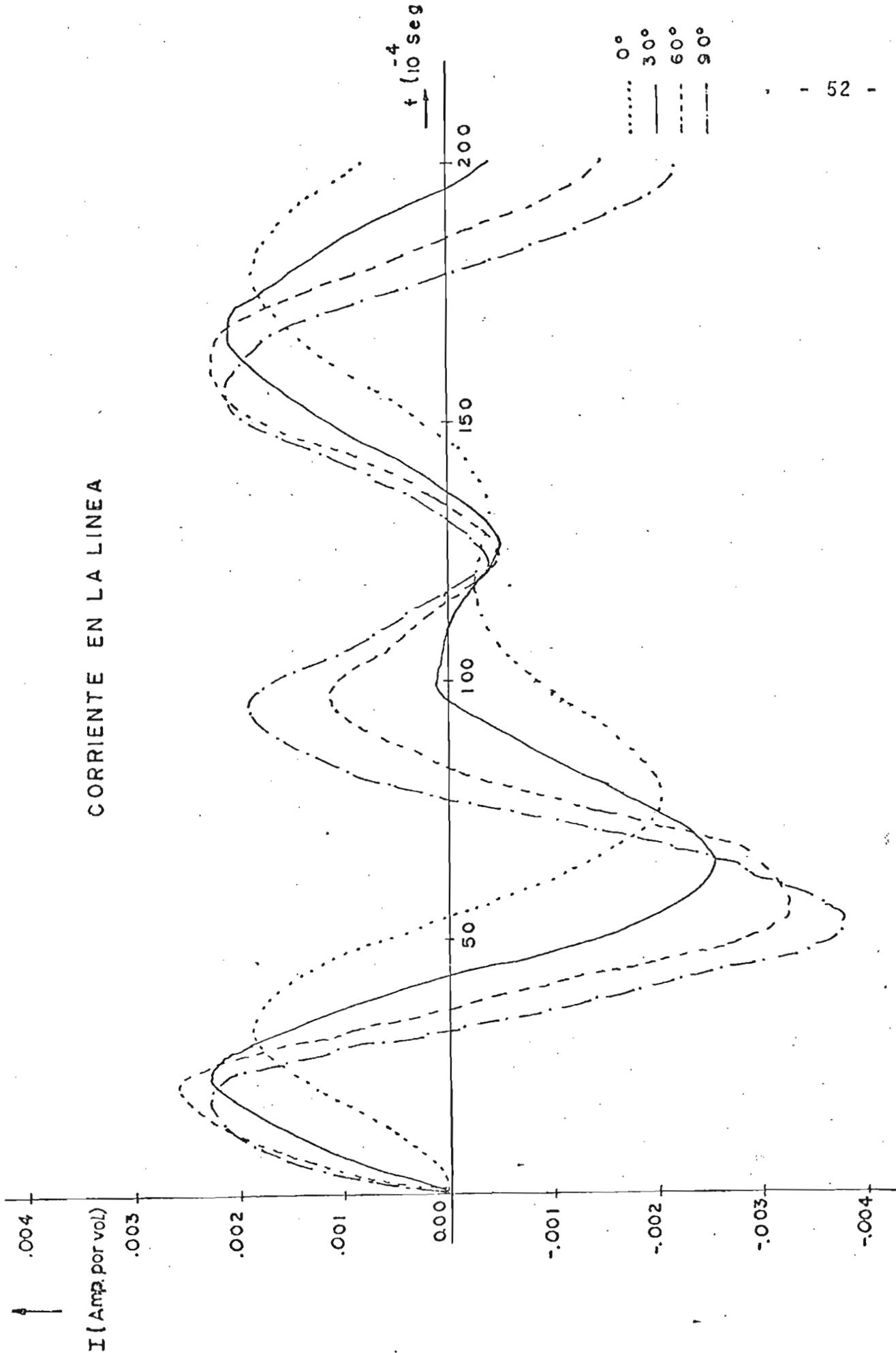
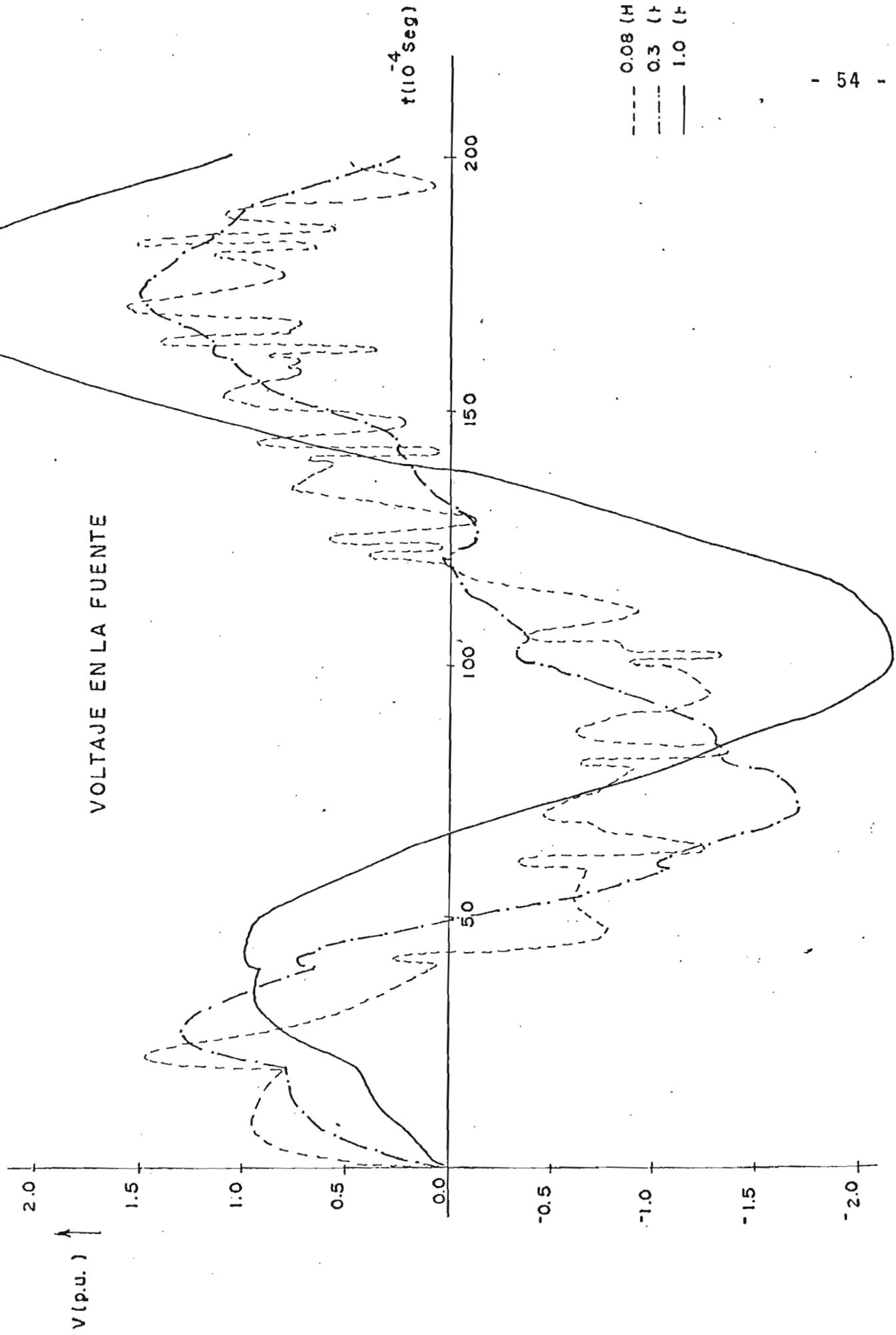


Fig 6.2.3 EFECTO DEL DEFASAMIENTO DEL VOLTAJE EN LA ENERGIZACION DE UNA LINEA



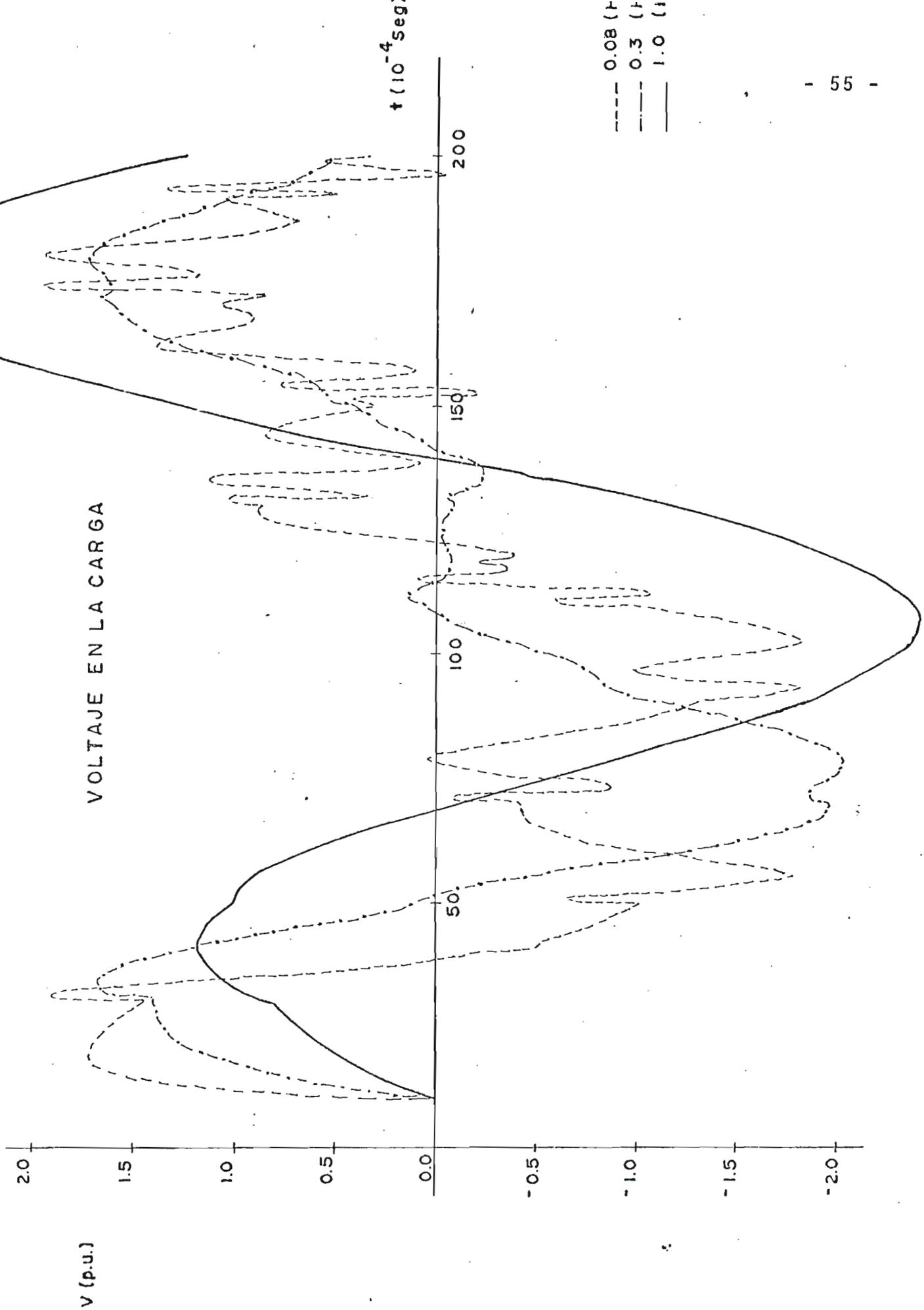


FIG. 233 EFECTO DE LA INDUCTANCIA DE LA FUENTE EN LA ENERGIZACION DE UNA LINEA

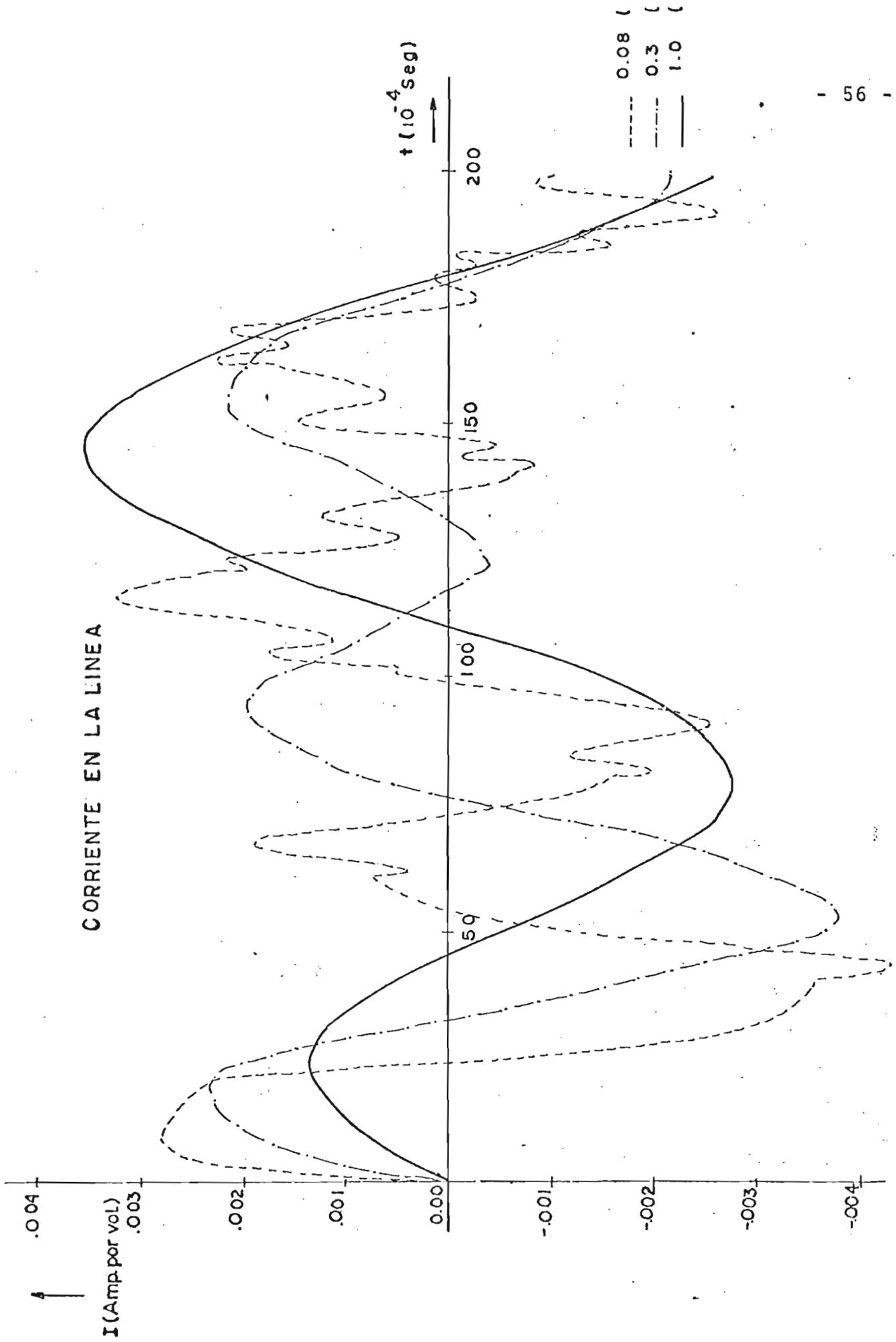


Fig 6.3.3 EFECTOS DE LA INDUCTANCIA DE LA FUENTE EN LA ENERGIZACION DE UNA LINEA

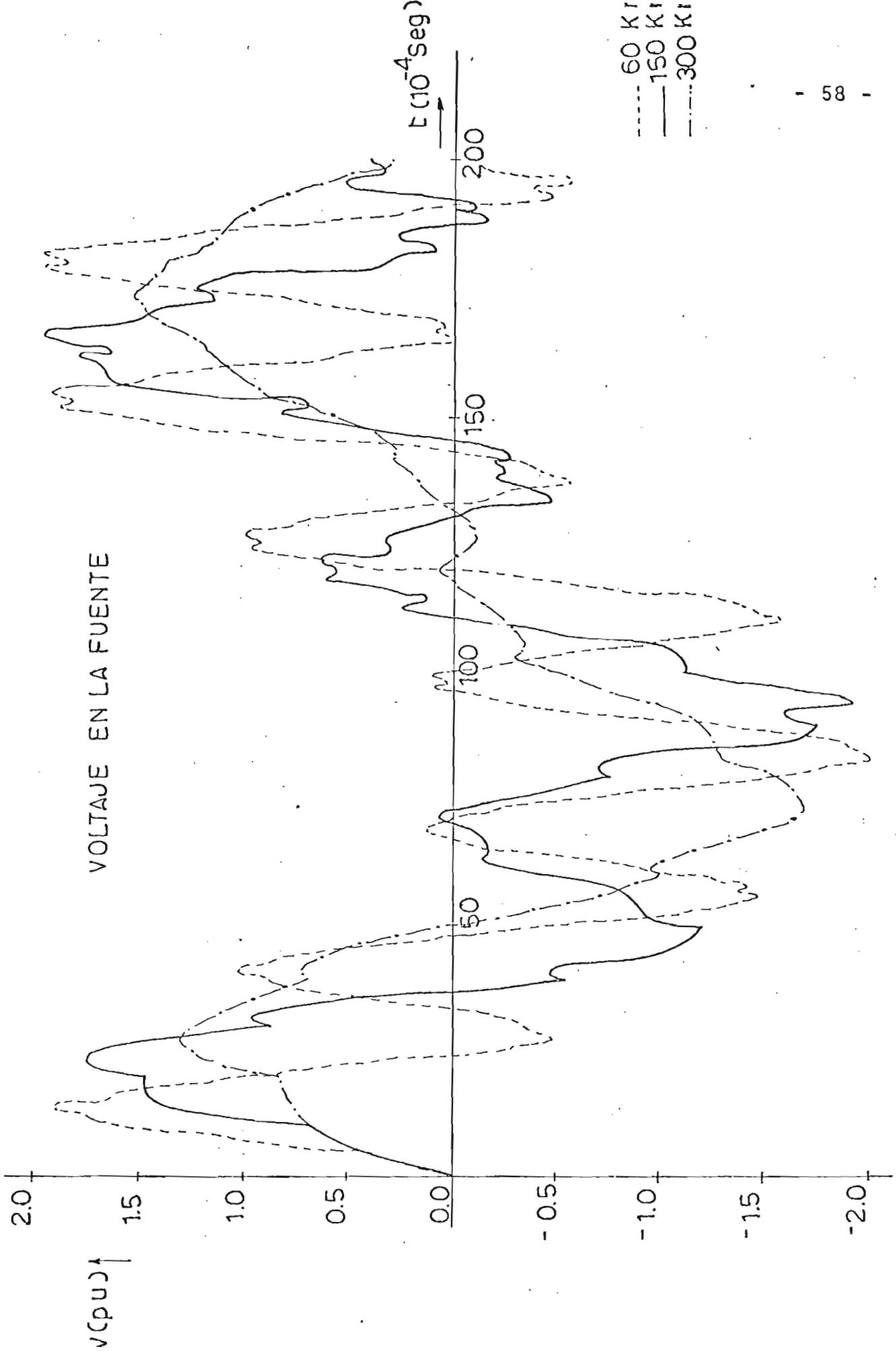


Fig 6.4.1 EFECTOS DE LA LONGITUD DE LA LINEA EN SU ENERGIZACION

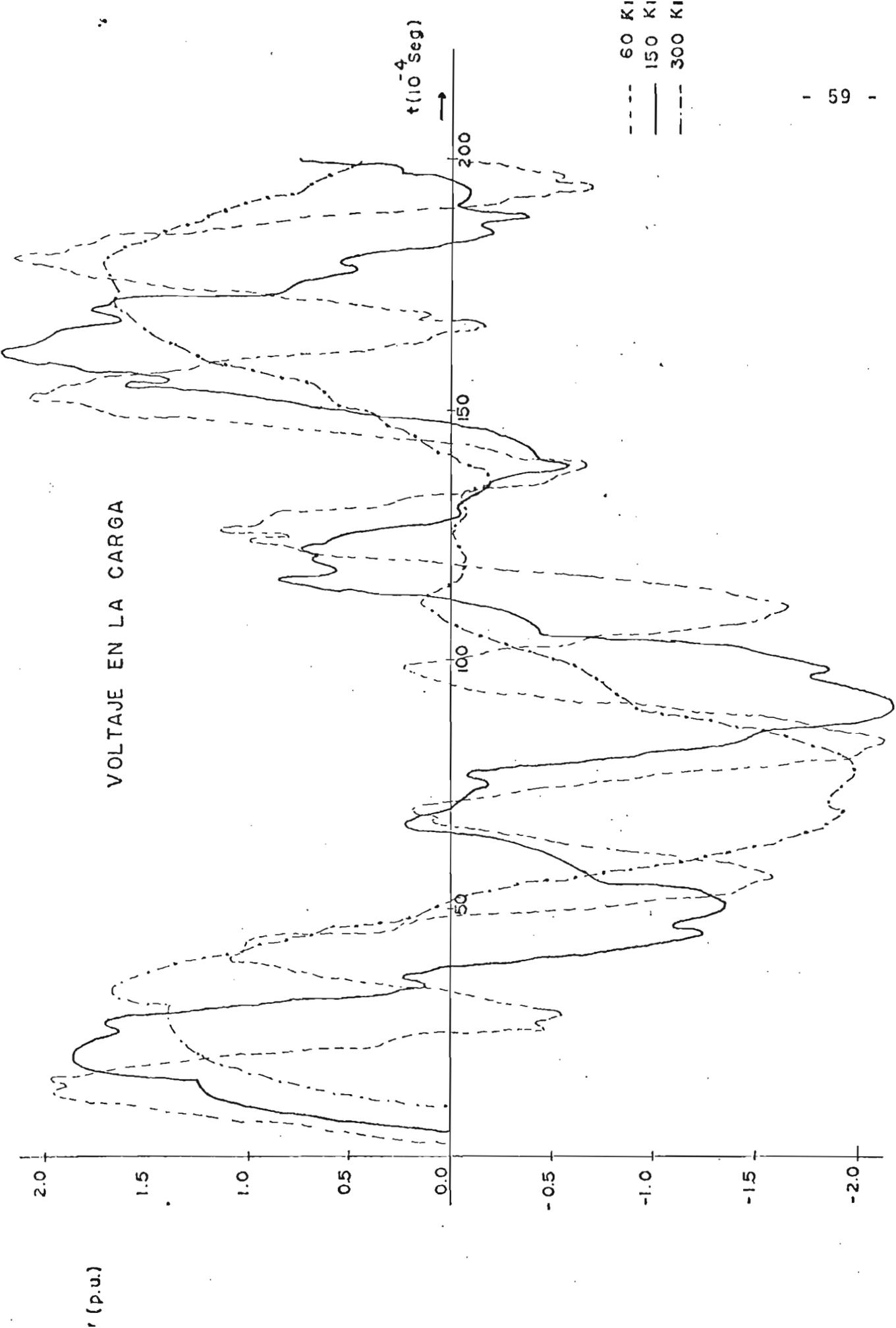


Fig 6.4.2 EFECTOS DE LA LONGITUD DE LA LINEA EN SU ENERGIZACION

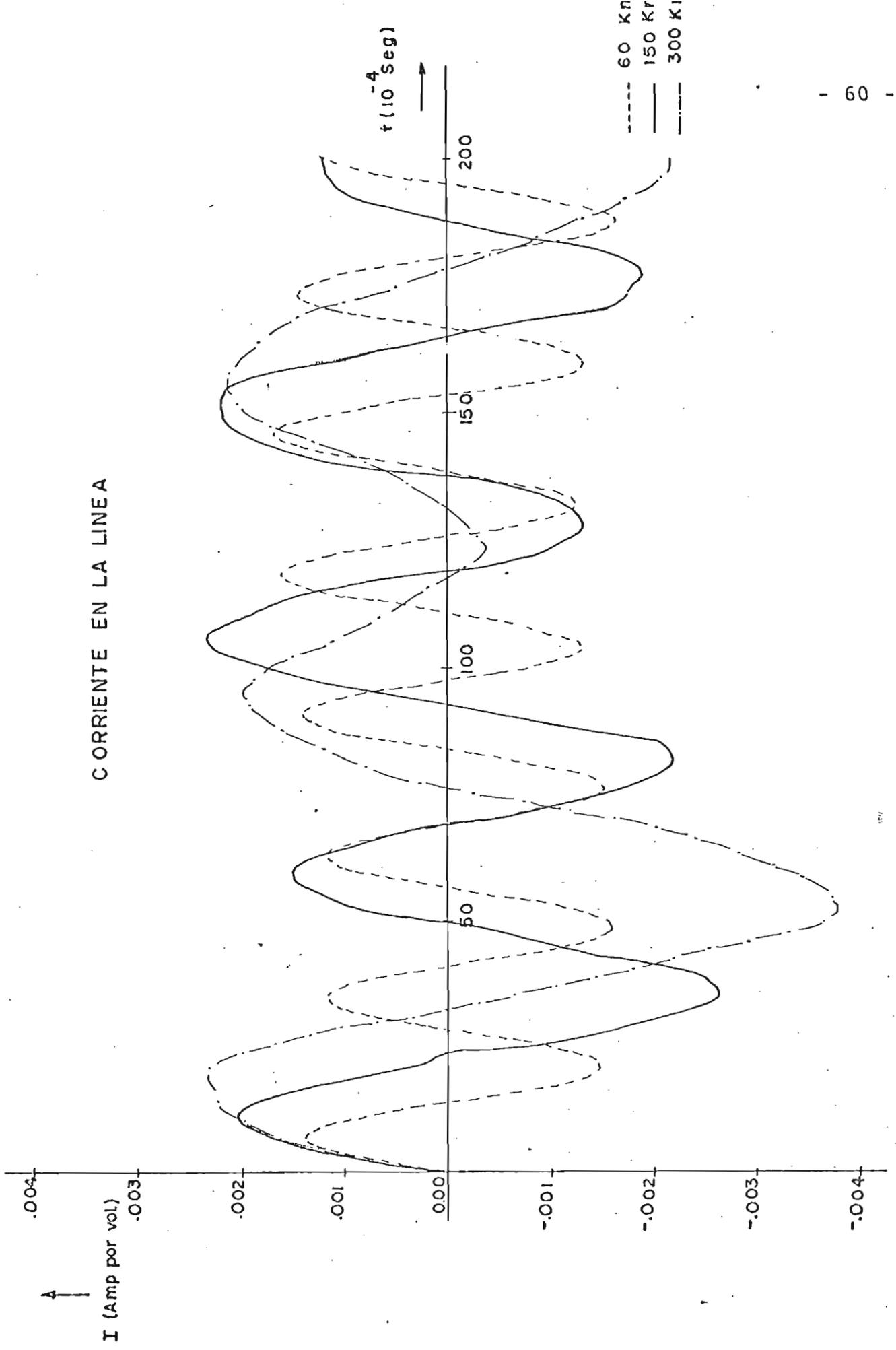


Fig 6.4.3 EFECTOS DE LA LONGUITUD DE UNA LINEA EN SU ENERGIZACION

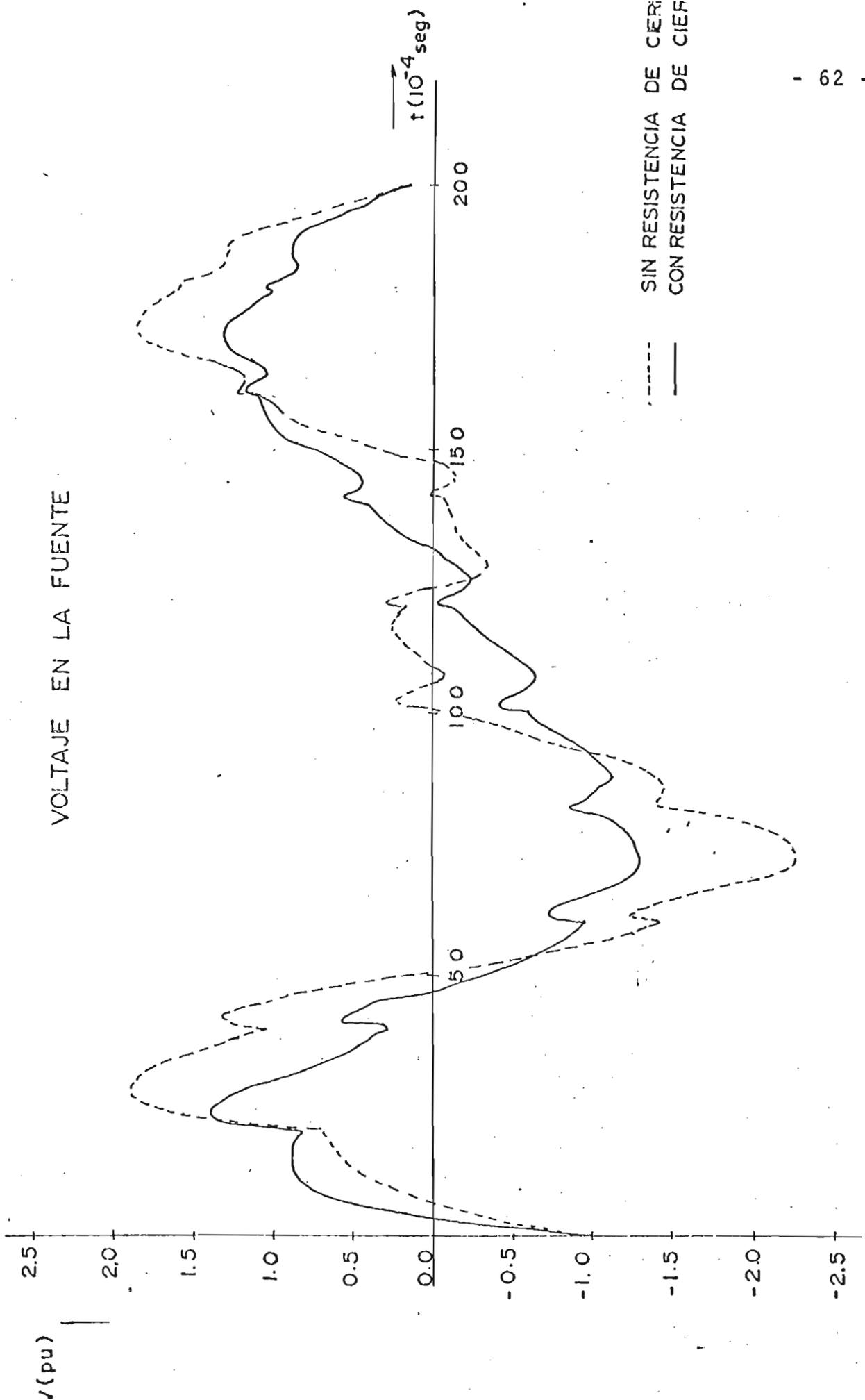


FIG. 6.61 RECONEXION DE UNA LINEA

VOLTAJE EN LA CARGA

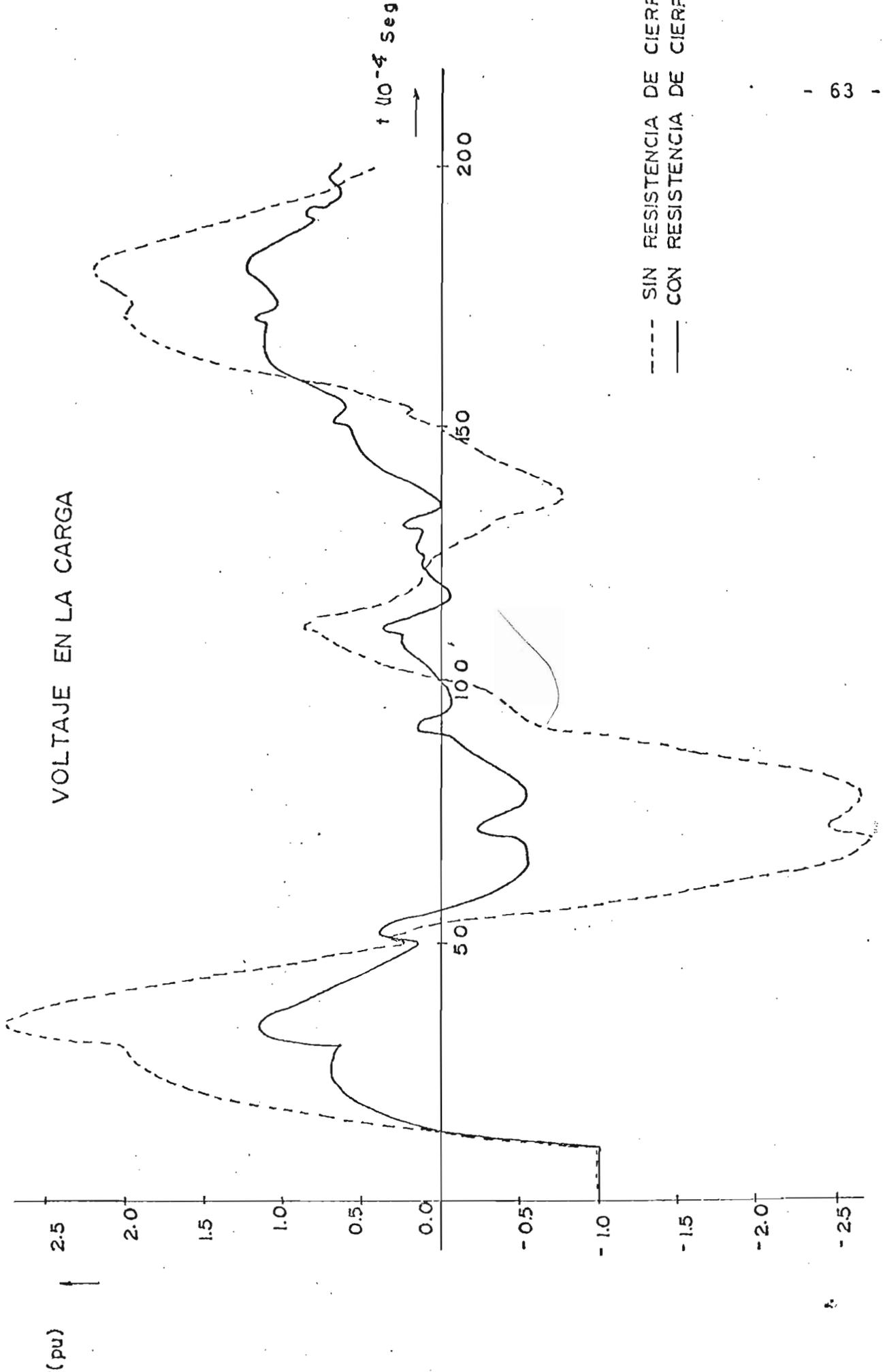


FIG 6.6.2 RECONEXION DE UNA LINEA

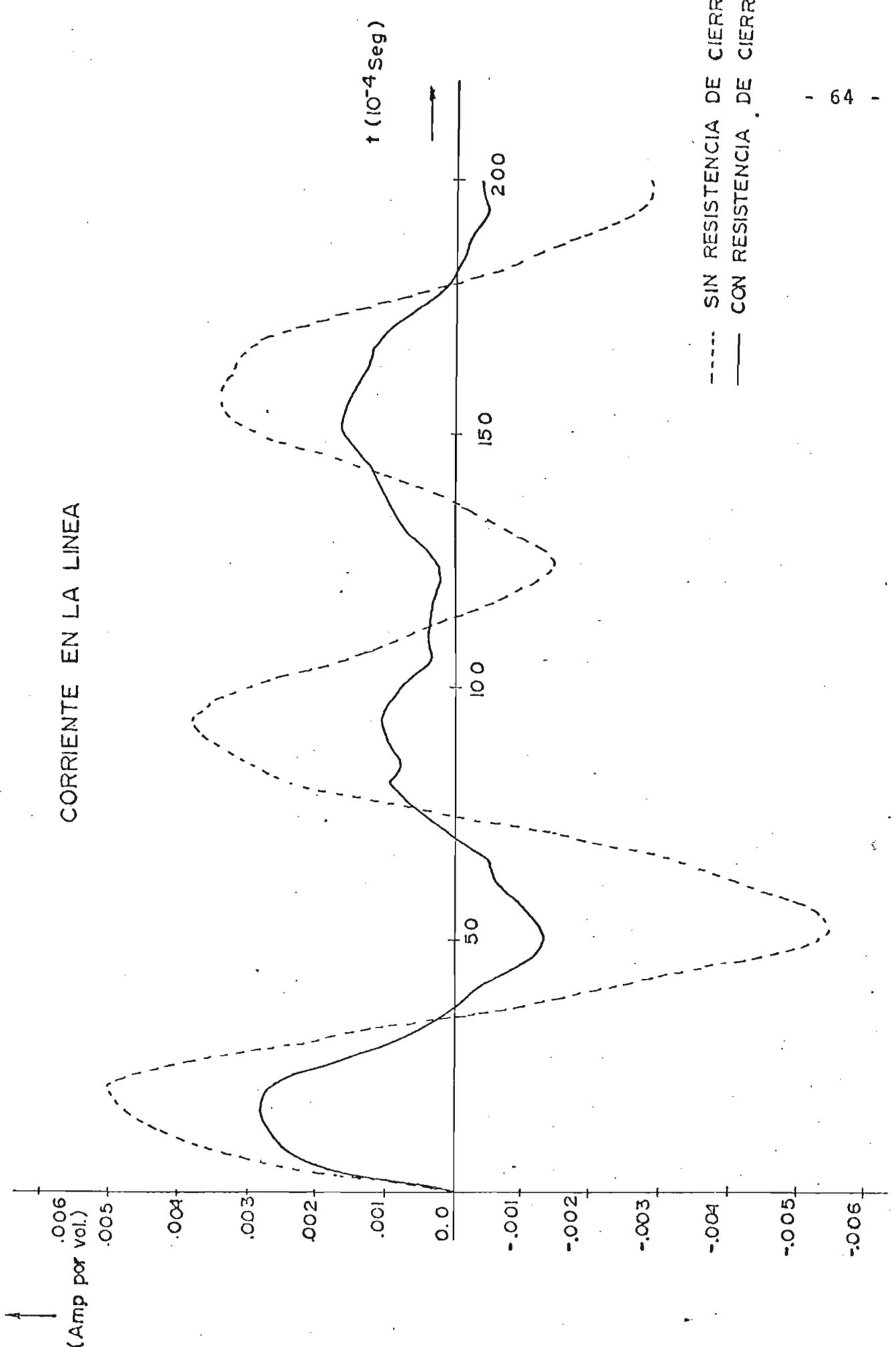


FIG. 6.6.3 RECONEXION DE UNA LINEA

ma y así mismo el valor óptimo de resistencia es cuando ésta es igual a la impedancia característica de la línea.

T A B L A T6.4.

$\ell = 300 \text{ <Km>}$ $L = 0.30 \text{ <H>}$ $V = 1.0 \text{ <fu>}$ $Z = 340 \text{ <\Omega>}$	$R = 340 \text{ <\Omega>}$ $t_R = 50 \times 10^{-4} \text{ seg.}$ $t <10^{-4} \text{ seg>}$ $I <10^{-2} \text{ Amp. por volt>}$
---	--

	En la fuente		En la carga		Línea nodo 1		Línea nodo 2	
	Vmax	t	Vmax	t	I _{max}	t	I _{max}	t
SinR	-2.2829	73	-2.7437	70	-54466	53	_____	_____
ConR	1.3988	24	+1.1613	34	.27206	15	_____	_____

C A P I T U L O V I I

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

En el diseño de sistemas de transmisión y distribución eléctricos, es necesario de informaciones confiables acerca de las magnitudes de sobrevoltajes y corriente transitorias a los que se encontrarán sujetos durante su operación, tanto en condiciones anormales (fallas, descargas, etc..), como bajo los efectos que ocasionan las maniobras y operaciones que se efectúen en el sistema, ya que este tipo de informacionaes constituyen el criterio que primará para elejir el nivel básico de aislamiento que haga del diseño el más óptimo posible tanto en el aspecto técnico como en el económico. Así mismo este tipo de informaciones facilita la selección de aparatos y equipos a la vez que condiciona la coordinación de las protecciones más adecuada para eliminar o amortiguar el efecto que este tipo de fenómenos pudieren ocasionar, limitándolos a niveles tolerables.

En el país se desconoce de trabajos efectuados al respecto, siendo cubierta la información necesaria directamente por las casas proveedoras de equipos y materiales y lo que es más en muchos de los sistemas especialmente los más grandes e importantes, ha sido necesario realizar estos estudios en lugares foráneos en los cuáles el adelanto técnico en el campo permiten efectuar todos los análisis necesarios.

Como resultado de la aplicación misma del programa, se ha podido comprobar la crítica situación a la que se encuentran sometidos los sistemas ante estos fenómenos a medida que los parámetros concentrados tienden a características puramente resistivas, agravándose la situación al tratarse de un sistema con líneas cortas y de baja atenua-

ción en los mismos que se experimenta un desmedido crecimiento de las magnitudes de sobretensión y corriente transitoria. Estos valores críticos de sobrevoltaje y corriente, sufren un notable decrecimiento con la presencia de parámetros concentrados con características inductivas o capacitivas. Ha sido también posible observar y comprobar el trabajo que efectúan las resistencias de cierre tendiente a limitar y eliminar la presencia de sobretensiones y corrientes en maniobras de energización y desenergización de líneas en vacío.

En conclusión, muchos y muy variados son los estudios que se posibilita mediante el empleo de este programa. Es oportuno entonces recomendar una mayor optimización de éste, para reducir el tiempo de ejecución del mismo, ya que habiéndose diseñado con miras a un modelo generalizado de sistema, es obvio que este tiempo sea exajeradamente grande y creciente en función de la magnitud del sistema y de la precisión que se exija de los resultados constituyéndose en uno de los factores más negativos para su empleo.

Un paso inmediato para el perfeccionamiento de este programa constituye su implementación a sistemas trifásicos, el mismo que no reviste de mayores complicaciones puesto que el establecimiento de ecuaciones diferenciales que constituye la base del programa permite una fácil modelación, sin embargo se necesitará antes, incrementar la capacidad del programa debido a que será tres veces mayor el número de caminos por los que dos nodos pueden conectarse, recomendándose cambiar el sistema de barras como referencia a las líneas existentes, con lo que se logrará eliminar al máximo la porocidad que presenta la matriz destinada a almacenar los valores de las señales entregadas a la celosía y siendo que esta matriz ocupa más de el 95% de la memoria empleada en el programa, se obtendrá con ello incrementar la extensión del modelo general a procesarse.

A P E N D I C E I

MODELACION DE SISTEMAS PARA EL EMPLEO DEL PROGRAMA:

CAPACIDAD DEL PROGRAMA:

El programa tiene capacidad para procesar un sistema compuesto por 17 barras en las que deberán estar incluidas la barra de referencia o tierra y el nodo ficticio para representar una falla.

La conexión entre las barras del sistema es indiferente en el uso del programa, existiendo la previsión de cuatro ramas para formar la impedancia de conexión línea-barras o barra-tierra, con capacidad para aceptar en serie una resistencia, una inductancia y una capacitancia en cada rama.

La fuente paralela, puede ser implementada en cualquier barra del sistema y los parámetros variables pueden localizarse al mismo tiempo en todas las barras del sistema.

La línea energizada y que une dos sistemas puede localizarse entre dos barras cualquiera.

La señal proveniente de la fuente paralela puede adoptar una forma de lo más general posible, la que se conseguirá asignando valores a los parámetros de la ecuación (3-24) mientras que para la diferencia de tensión en los puntos a conectarse cuando la línea que se energiza une dos sistemas así como para los voltajes primitivos adoptan la forma de la ecuación (3-24) de la que se han eliminado los exponentes por la poca probabilidad de su existencia.

La memoria rotativa consta de 100 unidades de tiempo,

1.2.

siendo en ellas representada una señal proveniente de una reflexión por un número de componentes igual a las 100 unidades, restadas el máximo tiempo de propagación existente en las líneas, expresado en incrementos de tiempo.

Las barras que poseen voltajes primitivos antes del disturbio pueden agruparse en dos grupos, cada uno de los cuales tendrá un valor y forma de onda para la señal específicos.

El número de unidades de tiempo a lo largo de las cuales se pide el estudio es indeterminado y deberá ser definido por el usuario.

RECOMENDACIONES PARA LA MODELACION:

Es conveniente preparar un diagrama simplificado del sistema en el que representarán todos los elementos existentes, se numerarán en forma consecutiva todas las barras del sistema incluyendo en ellas a la empleada para representar una falla o una descarga y teniendo el cuidado de asignar el máximo valor a la barra de referencia o tierra.

Todas las impedancias de conexión serán dispuestas mediante ramas en paralelo y numeradas todas las pertenecientes a una misma impedancia de conexión, teniéndose la precaución de asignar con el valor de uno a la rama que contiene la fuente.

Se toman los números máximos de barras y ramas en paralelo que deberán ser entregadas como datos al programa. En el caso de superar la capacidad del programa, será necesario simplificar el sistema mediante circuitos equivalentes.

Dando valores a los parámetros de la ecuación (3-24), se representará la señal proveniente de la fuente del disturbio, así como las señales de cada grupo de barras sometidas a voltajes primitivos.

Se calcula la menor constante de tiempo de los circuitos a formarse y se selecciona el menor tiempo de propagación de las líneas, valores con los que se procederá a escoger el incremento de tiempo a entregarse como dato al programa, el mismo que habrá de tener un valor que aproximadamente constituya la quinta parte de la constante de tiempo más pequeña, así como la quinta parte de tiempo de propagación de la línea más corta.

Una vez calculado el valor del incremento de tiempo, se procederá a expresar los tiempos de propagación de las líneas en múltiplos enteros de incremento calculado así como también el valor del tiempo durante el que se efectuará el estudio.

Con estas informaciones y mediante las recomendaciones que se encuentran en el apéndice II se procederá a codificar los datos que se necesita entregar al programa para su procesamiento.

LIMITACIONES:

Dado que el programa ha sido elaborado a fin de representar en forma generalizada cualquier sistema, encuentra pocas limitaciones siendo la principal la capacidad de barras en el sistema a procesarse así como el número de ramas en paralelo empleado para representar una impedancia de conexión, las que de ninguna manera podrán superar el número máximo enunciado, 17 y 4 respectivamente.

Al escoger el incremento de tiempo, es necesario tomar precauciones a fin de que el número de componentes mediante las cuales va a representarse una señal proveniente de una reflexión y que se dijo es igual a 100 menos el número máximo de incrementos de tiempo contenidos en el tiempo de propagación más grande de las líneas, asegure precisión en su representación.

La impedancia de cierre empleada para la maniobra tendiente a energizar un sistema debe ser necesariamente una resistencia.

El parámetro variable existente en cada barra solo puede estar conectado a tierra y ocupando únicamente una rama de la impedancia de conexión a tierra, así mismo es necesario que la fuente en paralelo ocupe siempre la rama numerada con el valor uno.

Finalmente, puesto que la matriz tiempos de propagación, a más de contribuir con su información específica, es utilizada por el programa para denotar la incidencia de señales a las barras, se constituye en condición necesaria que entre cada par de barras de las que se requiere información de voltaje y corriente y se encuentren unidas mediante un elemento, exista un determinado tiempo de propagación para las señales eléctricas a través de dicho elemento.

A P E N D I C E II

MANUAL DEL PROGRAMA

CODIFICACION DE DATOS.- El set de datos está compuesto por 8 tipos de datos que deben ser entregados por cada problema que requiere utilizar este programa. Si se desea procesar varios problemas al mismo tiempo, es suficiente con entregar el set de datos de cada problema, uno a continuación de otro.

Es necesario respetar el orden en el que se describirán los datos almacenados en las tarjetas cuyo grupo no se encuentra numerada; así como, el colocar una de tras de otra las tarjetas de un mismo grupo. Para una mejor comprensión ver el ejemplo de la Fig. A 1.1. y el formato para la codificación se puede encontrar en la tabla A 1.2.

Grupo # Dimensiones del sistema y precisión en el procesamiento.

Tarjeta	Columnas	Descripción
1	1-5	NB...Número de barras existentes más una de referencia o tierra.
1	6-10	RP...Número máximo de ramas en paralelo de que se encuentran formadas las impedancias de conexión.
1	11-15	NVS...Número de unidades de tiempo que se requiere en la salida como función del incremento T0.
1	16-20	KV...Indicador que precisa el fenómeno que se analiza KV = 1 para descargas atmosféricas en una línea.

Tarjeta	Columnas	Descripción
		KV = 2 para descargas atmosféricas en <u>u</u> na barra.
		KV = 3 para conexión de una fuente en <u>u</u> na barra.
		KV = 4 para conexión de una línea en <u>u</u> na barra.
		KV = 5 para desconexión de una línea de una barra.
		KV = 6 para desconexión de una fuente - de una barra.
		KV = 7 para cortocircuito en una línea.
		KV = 8 para cortocircuito en una barra.
1	21-25	JV... Barra utilizada para representar el fenómeno.
1	26-30	JW... Barra a la que conecta la línea - en los casos para los que KV vale 1,4,5 o 7.
1	31-40	EV... Voltaje que se puede despreciar.
1	41-50	EI... Corriente que se puede despreciar en el procesamiento.
1	51-60	T0... Incremento de tiempo en segundos.

Grupo #	<u>Nombre del programa y descripciones adicionales</u>	
1-2	1-80	Títulos generales.
3-7	1-80	Especificaciones de ángulo, frecuencia, etc.

Grupo #	<u>Condiciones primitivas del sistema</u>	
1	1-5	IND1...Número del grupo de las cargas que se leerán después.
1	6-10	KMAX...Máximo tiempo de propagación en las líneas expresado en incremento de tiempo.

Targeta	Columnas	Descripción
1	11-20	CPS... En la expresión A.1 indica el <u>coeficiente</u> a_5 siendo e el voltaje (en p.u. o valores reales) primitivo en las barras del sistema antes de la perturbación
1	21-30	CPC... Coeficiente del coseno en (A.1).
1	31-40	WSC... Valor del argumento w en (A.1). $e = a_5 \sin wt + a_6 \cos wt.$ (A.1).
1	41-50	CQS... Cuando el sistema se encuentra <u>dividido</u> en dos partes por la línea <u>causante</u> de la perturbación y en la expresión A.1. tiene el valor de a_5 , siendo e el voltaje en la parte restante del sistema no tocada con los coeficientes anteriores.
1	51-60	CQC. Coeficiente a_6 en el mismo caso de CQS.
1	61-70	WSQ... Argumento ω en el caso de CQS.

Grupo # 1 Características de las líneas

n	1-5	IND1...Indicador con valor 1 si la siguiente carta corresponde al mismo grupo o igual al número del grupo siguiente si n es la última carta de este.
n	6-10	I1...Barra al que se conecta un extremo de la línea.
n	11-15	J1...Barra en el que se conecta el otro extremo de la línea.
n	16-25	ZS...Impedancia característica de la <u>línea</u> (Ω).
n	26-35	TP...Tiempo de propagación expresado en incrementos T_0
n	36-45	ATE...Valor en por unidad al que se reduce una señal por efectos de la <u>atenuación</u> .

Tarjeta	Columnas	Descripción
(n se utiliza para indicar que es la misma tarjeta y de ellas pueden haber otras más).		
Grupo # 2 <u>Parámetros concentrados</u>		
n	1-5	IND1...Indicador con valor 2 si la siguiente carta es del mismo grupo o igual al número del grupo siguiente si n es la última carta de este.
n	6-10	I1...Barra en la que se encuentra conectado.
n	11-15	J1...Barra hacia la que se dirige.
n	16-20	K1...Número de la rama que constituye.
n	21-30	ZRS...Valor de la resistencia existente en esta rama (Ω)
n	31-40	ZLS...Valor de la inductancia existente en esta rama (H).
n	41-50	ZCS...Valor de la capacitancia existente en esta rama (f). (se recomienda dar un valor muy grande o muy pequeño a la resistencia para representar circuito abierto o cortocircuito respectivamente).
Grupo # 3 <u>Fuentes en conexión paralelo</u>		
n	1-3	IND2...Indicador con valor 3 si la siguiente tarjeta corresponde al mismo grupo o igual al número del siguiente grupo si n es la última tarjeta de este grupo.
n	4-6	J2... Indicador de la barra en que se encuentra.

Tarjetas	Columnas	Descripción
n	7-10	BAL...Valor auxiliar diferente de 0 que debe suministrarse necesariamente a pesar de no tener significado alguno.
n	11-20	BC01...Valor a_1 en la expresión A-2 la misma que representa la forma de la señal proveniente de la fuente.
n	21-30	BC02...Valor de a_2 en A-2.
n	31-40	BC03...Valor de a_3 en A-2.
n	41-50	BC04...Valor de a_4 en A-2.
n	51-60	BC05...Valor de a_5 en A-2.
n	61-70	BC06...Valor de a_6 en A-2.
n	71-80	BC07...Valor de ω en A-2. $e_1 = a_1 e^{a_2 t} + a_3 e^{a_4 t} + a_5 \sin \omega t + a_6 \cos \omega t \text{ (A-2)}$ (asignado valores a esta ecuación se entrega al programa la forma de onda de la señal proveniente del disturbio)

Grupo # 4 Parámetros variables (en el caso de existir)

n	1-5	IND1...Indicador con valor 4 si la siguiente tarjeta corresponde a este grupo o con el número del grupo siguiente si n es la última tarjeta de este.
n	6-10	J1...Barra a la que se encuentra conectado.
n	11-20	BPV...Valor igual al de la rama en el que se encuentra.
n	21-30	BKN1...Valor de K en A-3 ecuaciones que representan la forma en que varía los parámetros.
n	31-40	BKN2...Valor de n en A-3 $e = k i^{1-n}$ $R = i^{-n} \quad \text{(A-3)}$

Grupo # 5 Conexión de una línea entre dos sistemas

Tarjetas	Columnas	Descripción
1	1-5	IND1...Indicador con valor igual al número del grupo de tarjetas que se leerán a continuación.
1	6-10	J1...Barra sobre la que se efectúa la maniobra.
1	11-20	BC01...En el caso de efectuarse el cierre mediante una resistencia, contiene el valor del tiempo en T0s al que se circuito la resistencia de lo contrario es 0.
1	21-30	BC02...Valor de la resistencia de cierre (si se utiliza).
1	31-40	BC05...Si A-1 es el valor del voltaje que tiene la barra, esta variable contiene a a_5 .
1	41-50	BC06...Valor de a_6 en A-1
1	51-60	BC07...Valor de ω en A-1

Grupo # 6 Indicadores auxiliares de voltaje primitivos

L	$3n+1-3n+3$	IBA(n+1)...Indicador con valor 0 si la barra n+1 no tiene voltaje primitivo, 1 si corresponde a A-1 con los valores de CPS, CPC, WSC y 2 si corresponde a A-1 con los valores CQS, CQC y WSQ. n puede variar entre 0 y 16.
---	-------------	--

FORMATOS PARA LA CODIFICACION DE DATOS:

<u>VARIABLE</u>	<u>FORMATO</u>	<u>VARIABLE</u>	<u>FORMATO</u>
ATE	E10.4	JV	I5
BAL	F4.0	JW	I5
BC01	E10.4	I1	I5
BC02	E10.4	I2	I3
BC02	E10.4	IBA	I3
BC04	E10.4	IND1	I5
BC05	E10.4	IND2	I3
BC06	E10.4	K1	I5
BC07	E10.4	KMAX	I5
BKN1	E10.4	KV	I5
BKN2	E10.4	NB	I5
BP	I5	NVS	I5
BPV	E10.4	RP	I5
CPC	E10.4	T0	E10.4
CPS	E10.4	TP	E10.4
CQC	E10.4	ZCS	E10.4
CQS	E10.4	ZLS	E10.4
EV	E10.4	ZRS	E10.4
EI	E10.4	ZS	E10.4
J1	I5	WSC	E10.4
J2	I3	WSQ	E10.4

TABLA A 1.2

R E F E R E N C I A S
=====

1. Bewley L.V., "TRAVELING WAVES ON TRANSMISSION SYSTEMS", John Wiley and Sons, Inc. New York 1951
2. Peterson H.A., "TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS", John Wiley and Sons, Inc. New York 1957.
3. Bares J.L., Gardner M.F., "TRANSIENTS IN LINEAR SYSTEMS STUDIES BY THE LAPLACE TRANSFORMATIONS", John Wiley and Sons, Inc, New York 1942.
4. Fich S., "TRANSIENT ANALYSIS IN ELECTRICAL ENGINEERING", Prentice Hall Electrical Engineering Series, New Jersey 1951.
5. Lathi B.P., "SIGNAL SYSTEMS AND COMMUNICATION" John Wiley and Sons Inc. New York 1965.
6. Wagner C.F., McCann G.M., "ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION SYSTEMS REFERENCE BOOK", Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh Pennsylvania 1964.
7. Kreiszing E., "ADVANCED ENGINEERING MATHEMATICS", John Wiley and Sons, Inc. New York 1968.
8. Spiegel M.R. "TEORIA Y PROBLEMAS DE MATEMATICAS SUPERIORES PARA INGENIEROS Y CIENTIFICOS", Editorial McGraw Hill, Colombia 1971.
9. McCracken D.D., "PROGRAMACION FORTRAN IV", Editorial Linusa S.A., México 1975.
10. Nieto J.A., "METODOS NUMERICOS EN COMPUTADORAS DIGITALES", Editorial Linusa S.A. México 1972.
11. Franklin W.S. "SOME SIMPLE EXAMPLES OF TRANSMISSION LINE SURGES" AIEE Trans 33. Part 1914 pag. 547-561.
12. Burnham E.J. "OVERVOLTAGE ON TRANSMISSION SYSTEMS DUE TO DROPPING OF LOAD" AIEE Trans. 44 1925 Pag. 872-880.
13. Barthold L., Carter A., "DIGITAL TRAVELING WAVES SOLUTIONS PART I SINGLE PHASE EQUIVALENTS", AIEE Transactions pt. II (Power Apparatus and Systems), Vol 80, Dic. 1961 pags. 812-820.

14. McElroy A., Porter R., "DIGITAL COMPUTER CALCULATION OF TRANSIENTS IN ELECTRIC NETWORKS", IEEE Transactions of Power Apparatus and Systems, vol. 82 April 1963, pags. 88-95.
15. Uram, R. And Miller R.W.: "MATHEMATICAL ANALYSIS AND SOLUTION OF TRANSMISSION LINE TRANSIENTS", IEEE Trans. 1964, Pas. 83, pp. 116-1123.
16. Bickford, J.P. and Doeper, PS.: "CALCULATION OF SWITCHING TRANSIENTES WITH PARTICULAR REFERENCE TO LINE ENERGISATION", Proc. IEE, 1967, Vol. 114, N° 4, pp.465-477.
17. Arlett, P.L. and Murray-Shelley, R.: "THE USE OF THE GRAPHICAL METHOD FOR THE SOLUTION OF TRANSIENTS ON SIMPLE SYMMETRICAL THREE PHASE SYSTEMA", Int. Journal E.E.Ed., 1967, N° 5, pp. 377.
18. Dommel, H.W.: "DIGITAL COMPUTER SOLUTION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN SINGLE ANS MULTI PHASE NETWORKS", IEEE Tans. 1969. Vol. PAS 88, pp. 388-399.
19. Thorem H. Carlson K.: "A DIGITAL COMPUTER PROGRAM FOR THE CALCULATION OF SWITCHING AND LIGHTING SURGES ON POWER SYSTEMS", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol. 89, Febrero 1970, pags. 212-17.
20. Snelson J."PROPAGATION OF TRAVELING WAVES ON TRANSMISSION LINES FRECUENSY DEPENDENT PARAMETERS", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Vol 91 Enero 1972 pags. 85-90.
21. Wasley R., Selvavinayugamoorthy S.; "FORWARD AND BAKWARD RESPONCE FUNCTIONS FOR TRANSMISSION LINE TRANSIENTE ANALYSIS", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Mayo 1973, pags. 685-92.
22. Adam, Semlyen, "ANALYSIS OF DISTRUBANCE PROPAGATION IN POWER SYSTEMS OF HOMOGENEOUS DINAMIC MODEL", IEEE Transactions Power Apparatus and Systems, Mayo 1973, pag.676-81.

23. Wasley R.G. and Selvavinayagamorthy, S.: "APPROXIMATE ANALYTIC FORMULAE FOR TRANSMISSION LINE FORWARD AND BACKWARD RESPONSE FUNCTIONS IN THE TIME DOMAIN", IEEE, 1974, Winter Meeting, C. 74, 066-7.
24. Orbe, P.E.: "APPLICATIONS OF DIGITAL COMPUTER METHODS TO THE CALCULATION OF TRANSIENT FAULT VOLTAGES AND CURRENTS", MSc. Thesis, Manchester 1976.