



D-6651

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"CALCULO DE SOBRETENSIONES EN SISTEMAS DE POTENCIA"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR:

EDUARDO ENRIQUE RODRIGUEZ CHIWAH

GUAYAQUIL - ECUADOR

1983

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

Al Ing. JOSE LAYANA CH.,
Director de Tesis, por su ayu
da y colaboración para la rea
lización de este trabajo.

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MI ESPOSA

...



ING. JOSE LAYANA CH.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



A handwritten signature in black ink, written in a cursive style. The name 'Rodríguez' is clearly legible, with a large, stylized 'R' and 'D'. The signature is written over a horizontal dashed line.

EDUARDO ENRIQUE RODRIGUEZ CH.

R E S U M E N

El conocimiento de la magnitud de las sobretensiones que pueden producirse en un sistema eléctrico de potencia, - permite el tomar las medidas adecuadas para proteger los equipos y dispositivos del sistema, asegurando de esta - manera la continuidad de servicio al usuario.

En el presente trabajo, empleando el Método de Ondas Viajeras y el Método de Bergerón, se desarrollan programas de computación para calcular sobretensiones transitorias en redes monofásicas.

Los programas elaborados permiten resolver problemas de sobretensiones en sistemas radiales o enmallados.

Se establecen las bases teóricas y se describen las características más importantes de los programas, finalmente, se presentan resultados de su aplicación a problemas específicos.

INDICE GENERAL

	<u>PAG</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VII
INDICE DE FIGURAS -----	XI
INTRODUCCION -----	17
 CAPITULO I	
SOLUCION DE FENOMENOS TRANSIENTES Y METODOS DE ANA <u>LISIS</u> -----	18
1.1. TRANSIENTES EN LINEAS DE TRANSMISION -----	18
1.2. METODOS DE ANALISIS -----	27
1.2.1. Analizador de Redes Transientes -----	31
1.2.2. Método de la Transformada de Fourier-----	37
1.2.3. Método de Ondas Viajeras -----	39
1.2.4. Método de Bergerón-----	44
1.3. CALCULO DE TRANSIENTES ELECTROMAGNETICOS POR MEDIO DE UNA COMPUTADORA DIGITAL-----	51
1.4. OBJETIVO DEL PRESENTE TRABAJO-----	53
 CAPITULO II	
METODO DE ONDAS VIAJERAS PARA EL CALCULO DE SOB <u>RE</u> TENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO UNA COMPUTA <u>A</u> DORA DIGITAL -----	55
2.1. CIRCUITOS CON PARAMETROS DISTRIBUIDOS -----	55

2.2.	LA ECUACION DE ONDA Y SOLUCIONES DE D"ALEMBERT	67
2.3.	REFLEXION Y REFRACCION DE ONDAS -----	78
2.4.	REDUCCION DE LA RED ELECTRICA -----	87
2.4.1.	Lineas finitas -----	88
2.4.2.	Líneas semi-infinitas -----	90
2.4.3.	Coeficientes de transferencia -----	93
2.4.4.	Matriz Rama-Tiempo -----	95
2.5.	EJEMPLO ILUSTRATIVO DE LA REDUCCION DE UNA RED Y SOLUCION -----	100
CAPITULO III		
	DESARROLLO DE PROGRAMAS DE COMPUTACION PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO EL METODO DE ONDAS VIAJERAS -----	119
3.1.	ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROGRAMA DESARROLLA <u>DO</u> DO -----	119
3.2.	DESCRIPCION DEL PROGRAMA -----	120
3.2.1.	Promgrama Fuente -----	121
3.2.2.	Subprogramas -----	124
3.2.3.	Diagramas de Flujo -----	126
3.2.4.	Listado de Programas -----	133
3.2.5.	Datos de Entrada Requeridos por el programa y opciones para los datos de salida.--	144
3.3.	EJEMPLOS DE APLICACION DEL PROGRAMA A PROBLEMAS ESPECIFICOS -----	154
3.4.	ANALISIS DE RESULTADOS -----	176

CAPITULO IV

METODO DE BERGERON PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO UNA COMPUTADORA DIGITAL-	181
4.1. ANTECEDENTES HISTORICOS DEL METODO DE BERGERON-	181
4.2. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PA RA UNA LINEA SIN PERDIDAS -----	186
4.3. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PA RA UNA RESISTENCIA-----	191
4.4. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PA RA UNA INDUCTANCIA -----	191
4.5. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PA RA UNA CAPACITANCIA -----	205
4.6. DESARROLLO DE UN ALGORITMO COMPUTACIONAL -----	211

CAPITULO V

DESARROLLO DE PROGRAMAS DE COMPUTACION PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO EL METODO DE BERGERON -----	226
5.1. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROGRAMA DESARROLLA DO -----	226
5.2. DESCRIPCION DEL PROGRAMA -----	228
5.2.1. Programa Fuente -----	228
5.2.2. SUBPROGRAMAS -----	231
5.2.3. Diagramas de Flujo -----	235
5.2.4. Listado de Programas -----	250
5.2.5. Datos de Entrada Requeridos por el programa y opciones para los Datos de Salida--	267

5.3. EJEMPLOS DE APLICACION DEL PROGRAMA A PROBLEMAS	
ESPECIFICOS -----	278
5.4. ANALISIS DE RESULTADOS -----	308
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	314
APENDICES -----	318
BIBLIOGRAFIA -----	385

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>PAG</u>
CAPITULO I		
1.1.1.	ONDA DE SOBREVOLTAJE EN UNA LINEA DE TRANSMISION -----	22
1.1.2.	ENERGIZACION DE UNA LINEA CON CARGA ATRAPADA -----	24
1.2.1.1.	SECCION PI MONOFASICA COMPENSADA-----	33
1.2.4.1.	REPRESENTACIONES DE UNA LINEA MONOFASICA IDEAL DE PARAMETROS DISTRIBUIDOS -----	45
1.2.4.2.	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LINEA MONOFASICA IDEAL DE PARAMETROS DISTRIBUIDOS -----	47
1.2.4.3.	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN ELEMENTO CONCENTRADO -----	49
CAPITULO II		
2.1.1.	LINEA DE TRANSMISION DE DOS HILOS -----	57
2.1.2.	REPRESENTACION "CONCENTRADA" DE UNA LINEA DE DOS HILOS -----	59
2.2.1.	PEQUEÑO ELEMENTO DE UNA LINEA DE TRANSMISION -----	68
2.2.2.	LA FUNCION $F_1(x+vt)$ a $(i)t=0$ y $(ii) t=\gamma$ ----	73

2.2.3. VARIAS COMBINACIONES DE LAS ONDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE -----	76
2.2.4. ONDAS OPUESTAS -----	77
2.3.1. ONDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE REFLEJADAS Y REFRACTADAS EN LA UNION ENTRE DOS LINEAS-----	82
2.3.2. ONDAS VIAJERAS DE VOLTAJE EN LA BIFURCACION DE UNA LINEA -----	85
2.4.1.1. LINEA FINITA -----	87
2.4.2.1. LINEA SEMI-INFINITA -----	92
2.4.3.1. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA -----	94
2.4.4.1. SISTEMA MONOFASICO RADIAL -----	96
2.4.4.2. MATRIZ RAMA - TIEMPO -----	97
2.5.1. RESISTOR EN SERIE-----	101
2.5.2. TRANSFORMADOR IDEAL EN SERIE -----	103
2.5.3. RED CON INTERRUPTORES MULTIPLES -----	105
2.5.4. REPRESENTACION DE UNA CAPACITANCIA EN SERIE-----	110
2.5.5. REPRESENTACION DE UNA INDUCTANCIA EN SERIE--	112
2.5.6. EJEMPLO DE UNA RED REDUCIDA -----	114
2.5.7. RAMA - TIEMPO -----	115

CAPITULO III

3.3.1. RED MONOFASICA ENMALLADA -----	155
3.3.2. HOJA DE DATOS DE ENTRADA -----	156
3.3.3. IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA -----	157
3.3.4. CORRIENTES Y/O VOLTAJES DE SALIDA -----	159
3.3.5. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N ^o 2 -----	160
3.3.6. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N ^o 4 -----	161

3.3.7. TERMINACION CAPACITIVA DE UNA LINEA MONOFASICA RED FISICA -----	162
3.3.8. RED REDUCIDA, INTERRUPTOR S ABIERTO -----	164
3.3.9. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°2 -----	166
3.3.10. RED REDUCIDA, INTERRUPTOR S CERRADO -----	167
3.3.11. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°2 -----	169
3.3.12. LINEA MONOFASICA CON TERMINACION LC, RED FISICA -----	171
3.3.13. LINEA MONOFASICA CON TERMINACION LC, RED REDUCIDA -----	172
3.3.14. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°2 -----	172
3.3.15. ENERGIZACION DE UNA RED MONOFASICA ENMALLADA	175
3.3.16. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO 2 -----	177
3.3.17. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°3 -----	178
3.3.18. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODOS N°4 -----	179
CAPITULO IV	
4.1. REPRESENTACION DE UNA LINEA POR UN CUADRIPOLO ----	191
4.2.a. LINEA MONOFASICA SIN PERDIDAS -----	193
4.2.b. CIRCUITO EQUIVALENTE -----	194
4.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA RESISTENCIA -----	198
4.4. INDUCTANCIA CONCENTRA L' -----	199
4.5. REGLA TRAPEZOIDAL DE INTEGRACION -----	201
4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA INDUCTANCIA -----	204
4.7. CAPACITANCIA CONCENTRADA C' -----	207

4.8. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA CAPACITANCIA CONCEN	
TRADA C' -----	210
4.9. RED MONOFASICA QUE INCLUYE LOS CUATRO TIPOS DE RA	
MAS CONSIDERADOS -----	213
4.10.SOLUCIONES REPETIDAS PARA LAS ECUACIONES LINEALES	220
4.11.DIAGRAMA DE BLOQUES -----	225

CAPITULO V

5.3.1. CIRCUITO R-L-C SERIE -----	279
5.3.2. HOJA DE DATOS DE ENTRADA -----	281
5.3.3. IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA -----	282
5.3.4. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°3 -----	284
5.3.5. GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO NODO N°3 -----	285
5.3.6. GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO NODO N°3 -----	286
5.3.7. GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO NODO N°3 -----	287
5.3.8. GRAFICO CORRIENTE Vs. TIEMPO NODO N°3-----	289
5.3.9. SISTEMA MONOFASICO RADIAL -----	289
5.3.10.GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°1 -----	291
5.3.11.GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO NODO N°2 -----	292
5.3.12.GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO -----	293
5.3.13.GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO NODO N°4 -----	294
5.3.14.GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO 5 -----	295
5.3.15.RED LC TIPO ESCALERA -----	296
5.3.16.GRAFICO VOLTAJE Vs.TIEMPO NODO N°6 -----	297
5.3.17.LINEA CON CARGA R-L SERIE -----	299
5.3.18.GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO 2 -----	300
5.3.19.GRAFICO CORRIENTE Vs.TIEMPO -----	301

5.3.20. LINEA MONOFASICA CON CARGA R-L SERIE C PARALELO -----	302
5.3.21. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°2 --	305
5.3.22. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°3----	306
5.3.23. RED MONOFASICA ENMALLADA -----	307
5.3.24. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO 1 ----	309
5.3.25. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°2---	310
5.3.26. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°3.--	311

APENDICES

A.1 REFLEXION DE ONDAS VIAJERAS DESDE UN CORTOCIR- CUITO -----	320
A.2 INCREMENTO DE LA CORRIENTE CUANDO OCURRE UN - CORTOCIRCUITO EN UNA LINEA DE TRANSMISION ----	323
A.3 ONDAS VIAJERAS OCASIONADAS POR LA ENERGIZACION DE UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO -----	326
A.4 ONDAS VIAJERAS EN UNA LINEA DE TRANSMISION CON TERMINACION CAPACITIVA -----	332
A.5 ONDAS VIAJERAS EN UNA LINEA CON TERMINACION IN DUCTIVA -----	336
B.1 MODELO PARA EL TRATAMIENTO APROXIMADO DE LINEAS CON RESISTENCIA EN SERIE -----	339
B.2 RESISTOR E INDUCTOR EN SERIE -----	341
B.3 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONEXION R-L SERIE	344
B.4 RESISTOR Y CAPACITOR EN SERIE -----	345

B.5	RESISTOR Y LINEA MONOFASICA EN SERIE -----	349
B.6	CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONEXION R-LINEA	353
C.1	CASOS ESPECIALES DE LA ECUACION C.1 -----	356
D.1	ELEMENTO NO LINEAL -----	362
D.2	SIMULACION DE UN ELEMENTO NO LINEAL -----	364
D.3	SOLUCION GRAFICA DEL SISTEMA DE ECUACIONES D.6	367
D.4	CARACTERISTICA DEL PARARRAYOS APROXIMADA POR TRAMOS RECTOS-----	373

I N T R O D U C C I O N

En el diseño de sistemas eléctricos de potencia es de importancia crítica la determinación del aislamiento adecuado de sus elementos.

No es posible seleccionar el aislamiento solamente en base al voltaje normal de operación del sistema, sino que deben considerarse los transientes ocasionados ya sea - por descargas atmosféricas, maniobras en el sistema u otras causas, puesto que las perturbaciones de este tipo pueden dar lugar a que el voltaje alcance niveles mucho mayores al normal.

El problema consiste en determinar la magnitud y duración de las sobretensiones transientes que se presentan en los diferentes puntos del sistema cuando ocurre una perturbación debida a causas externas o internas.

Por otra parte, dada la gran cantidad de aspectos que intervienen en el fenómeno, es prácticamente imposible obtener resultados exactos, por lo cual las soluciones serán siempre de carácter aproximado.

CAPITULO I

SOLUCION DE FENOMENOS TRANSIENTES Y METODOS DE ANALISIS

1.1. TRANSIENTES EN LINEAS DE TRANSMISION

De acuerdo a la velocidad de los transientes, éstos pueden clasificarse de la siguiente manera:

CLASE A

Transientes ultrarápidos: fenómenos de sobretensión.

CLASE B

Transientes de velocidad media: fenómenos de corto circuito.

CLASE C

Transientes lentos: fenómenos de estabilidad transiente.

En este trabajo se estudian los fenómenos transien-

tes ultrarápidos, es decir transientes de clase A. Este tipo de transiente es ocasionado por descargas atmosféricas sobre líneas de transmisión expuestas y por cambios en la red que a pesar de ser normales son abruptos como aquellos causados por la operación de interruptores.

Estos transientes son enteramente eléctricos en cuanto a su naturaleza y esencialmente involucran a las líneas de transmisión, físicamente una perturbación de éste tipo causa una onda electromagnética - que viaja a lo largo de las líneas con una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz, ocasionando ondas reflejadas en las terminaciones de las líneas.

El fenómeno asociado con este tipo de ondas tiene lugar durante los primeros milisegundos posteriores a su iniciación; debido a las pérdidas siempre presentes en las líneas, las ondas se atenúan y finalmente dejan de existir.

Durante el proceso de reflexión pueden ocasionarse elevados sobrevoltajes los cuales pueden destruir el aislamiento del equipo de alta tensión, las cargas viajeras pueden ser descargadas a tierra por medio de los pararrayos los cuales, cuando funcio-

nan adecuadamente, actúan como verdaderas "válvulas de seguridad". Sin embargo, si el aislamiento se destruye en algún punto, ya sea en un transformador o entre las fases de las líneas, se producirá un cortocircuito, el cual es un cambio estructural de la red abrupto y anormal que dará lugar a un nuevo tipo de transiente pero más lento, es decir un transiente de clase B.

La razón principal para el estudio de los transientes de clase A es la de proporcionar las bases para la selección adecuada del nivel de aislamiento del equipo del sistema de potencia. Con el constante incremento de los voltajes de transmisión, el problema de los sobrevoltajes transientes se hace cada vez más importante, en el pasado las causas principales de tales sobrevoltajes en los sistemas de potencia fueron las descargas atmosféricas, sin embargo en los últimos años los voltajes de los sistemas se han incrementado hasta valores muy elevados, dando lugar a que las operaciones de maniobra de interruptores causen sobrevoltajes que pueden ser mayores que aquellos ocasionados por descargas atmosféricas. Por las razones anteriormente expuestas, en la actualidad se debe dar mucho más importancia que antes a los métodos computacionales que permiten -

predecir voltajes y patrones de corriente posteriores a la ocurrencia de una perturbación.

Cuando una onda de sobrevoltaje, viajando a lo largo de una línea de transmisión, alcanza un punto - en el cual existe un circuito abierto, ésta se refleja con el mismo signo, elevando el voltaje en dicho punto a un valor igual al doble del valor de la onda incidente. Esto se ilustra en la figura 1.1.1. en la cual a) es el origen de la sobretensión al cerrarse el interruptor, b) es la reflexión positiva de la onda cuando alcanza el terminal de la línea en circuito abierto y c) es la reflexión negativa de la onda al llegar a la fuente con resistencia interna nula.

Si el interruptor se cierra cuando ocurre el pico de voltaje de la fuente de alimentación, el efecto será el mismo que si se aplicará un escalón de voltaje igual en magnitud al voltaje fase-neutro de la fuente, ésta onda de voltaje viajará hacia el terminal lejano de la línea. Puesto que la línea se encuentra en circuito abierto en el terminal de recepción, no existirá onda transmitida; por lo tanto si la onda incidente es de 1 p.u., la onda reflejada

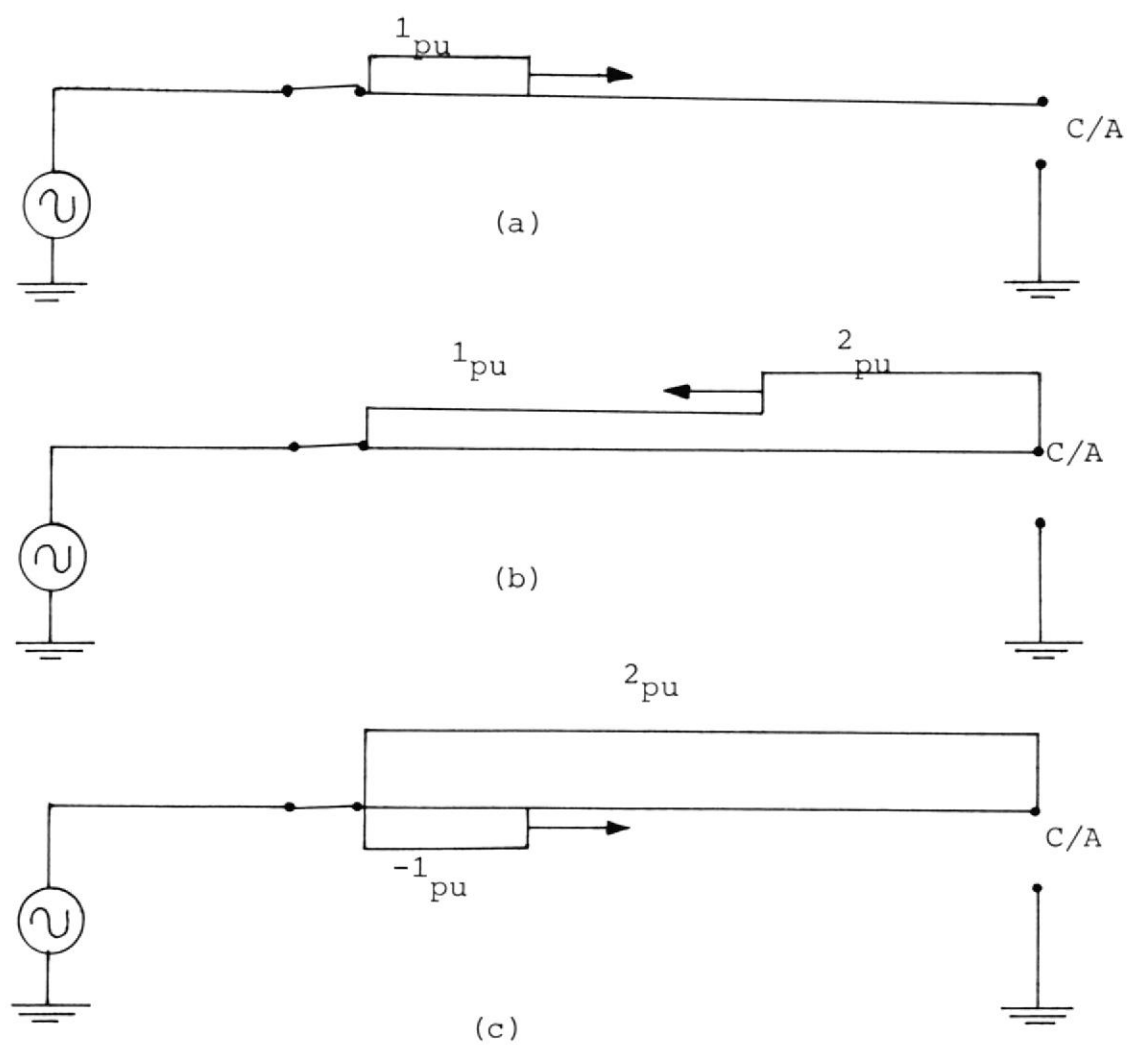


FIGURA 1.1.1. ONDA DE SOBREVOLTAJE EN UNA LINEA DE TRANSMISION.

en ese punto será de 2 p.u., es decir la reflexión será total y la onda reflejada, que viaja hacia atrás a lo largo de la línea, será de un valor igual al doble del valor de la onda incidente en ese punto.

La desenergización de la línea de transmisión puede ocasionar que exista un voltaje remanente de 1 p.u., en dicha línea y a pesar de que ésta carga atrapada puede ser ocasionalmente descargada a tierra por vías naturales a través de las trayectorias de dispersión, esto no ocurrirá instantáneamente sino que tomará cierto tiempo y si la línea se energiza nuevamente en un tiempo menor al tiempo de descarga natural, por ejemplo si ocurre una reconexión rápida, cuando la fuente está en su valor pico de polaridad opuesta al voltaje de la carga atrapada, entonces un escalón de voltaje de 2 p.u., será aplicado a la línea dando lugar a un voltaje de 3 p.u., en el terminal de la línea en circuito abierto. Esto se ilustra en la figura 1.1.2., en la cual a) muestra el origen de una sobretensión causada por el cierre del interruptor, b) la reflexión en el terminal de la línea en circuito abierto. El voltaje de 3 p.u. puede ser incrementado hasta en 0.3 p.u., de

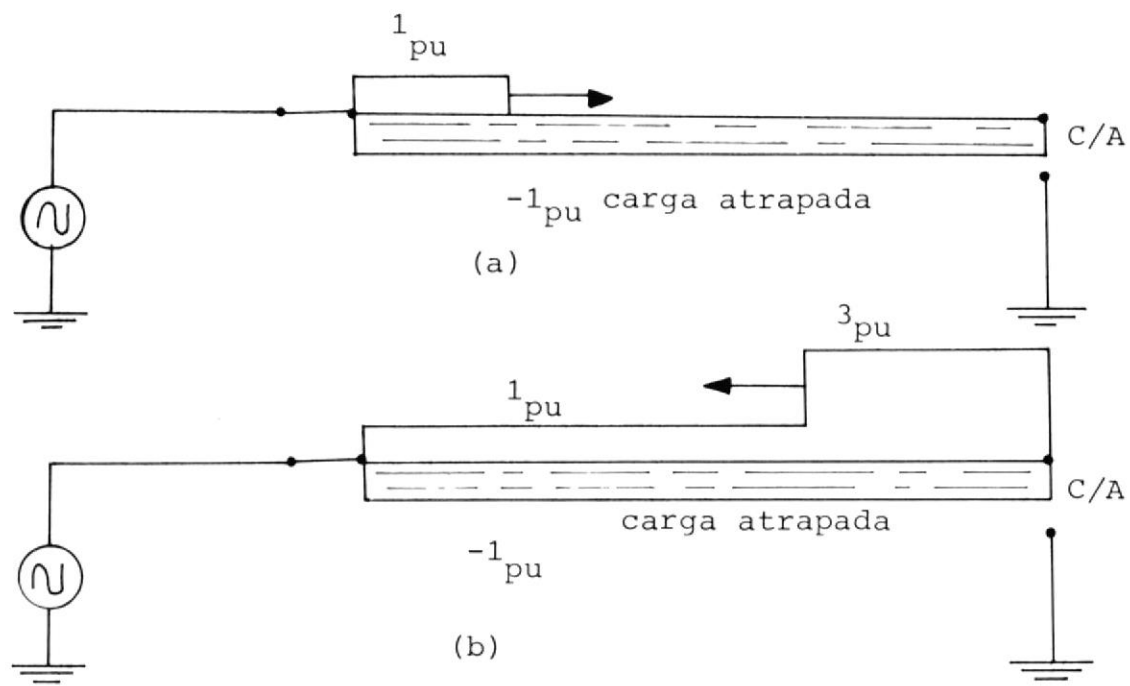


FIGURA 1.1.2. ENERGIZACION DE UNA LINEA CON CARGA ATRAPADA

bido al efecto Ferranti dependiendo de la longitud de la línea.

La magnitud del sobrevoltaje producido depende de la magnitud del voltaje atrapado en la línea y también del voltaje existente en la fuente de alimentación cuando ocurre la reconexión.

El máximo sobrevoltaje se presenta cuando la reconexión se produce al instante en el cual la fuente de alimentación tiene su valor pico y la línea está cargada a un voltaje de 1 p.u. de polaridad opuesta al voltaje de la fuente.

Una línea puede permanecer cargada prácticamente a voltajes de pico durante algunos segundos posteriores a la interrupción de la corriente, el cual es un tiempo mucho mayor que el usado en interruptores de alta velocidad, como se mencionó anteriormente, la línea descargará eventualmente a través de las trayectorias de dispersión, pero la velocidad de descarga estará gobernada principalmente por las condiciones climatológicas existentes.

Usualmente se requieren tiempos de 2 a 5 minutos para descargar una línea completamente, pero bajo con

diciones extremadamente secas éste tiempo puede incrementarse hasta 15 minutos o más. Los tiempos - de descarga de una línea pueden ser modificados - considerablemente si el interruptor está provisto de resistores de apertura o si existen reactores en paralelo conectados a la línea.

Los principales parámetros que definen las oscilaciones transientes son:

a. LA AMPLITUD DE LAS OSCILACIONES

En la mayoría de los casos el voltaje de pico es el de mayor interés debido a sus efectos tanto en el aislamiento interno como en el externo.

b. LA FRECUENCIA PREDOMINANTE DEL TRANSIENTE

Esta define en parte la forma de onda de las oscilaciones transientes y permite su correlación con ondas de prueba normalizadas.

c. EL GRADO DE AMORTIGUACION DEL TRANSIENTE

Este está determinado por la atenuación del sobrevoltaje a través de varios ciclos de oscilación.

La tabla 1.1.1., dá algunas operaciones de interruptores básicas en los sistemas de potencia, haciendo referencia al mecanismo más importante que causa el sobrevoltaje.

1.2. METODOS DE ANALISIS

A pesar de que el nivel de aislamiento de los sistemas debe ser lo suficientemente elevado con el objeto de que éstos tengan una buena confiabilidad, al mismo tiempo existen fuertes razones económicas para mantenerlo tan bajo como sea posible, en consecuencia, se le está dando mayor importancia a la necesidad de predecir los sobrevoltajes en la etapa de planificación de los sistemas, con el objeto de tomar las medidas adecuadas para reducir su severidad y minimizar el nivel de aislamiento tanto como sea posible.

Para el cálculo de transientes, los elementos de un sistema de potencia pueden ser divididos en dos tipos: en primer lugar, aquellos cuyos parámetros son esencialmente concentrados tales como generadores, transformadores, reactores y capacitores, en segundo lugar, las líneas aéreas y cables subterráneos cuyos parámetros son de naturaleza distribuida.

TABLA 1.1.1.

OPERACIONES DE INTERRUPTORES BASICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA

OPERACION	ELEMENTO DEL SISTEMA	MECANISMO BASICO
1. ENERGIZACION	LINEAS AEREAS	REFLEXION DE ONDAS VIAJERAS.
	CABLES	REFLEXION DE ONDAS VIAJERAS.
	LINEAS AEREAS/CABLES	REFLEXION/REFRACCION DE ONDAS QUE CAUSAN AMPLIFICACION.
	TRANSFORMADORES REACTORES	ONDAS VIAJERAS-DISTRIBUCION INTERNA - DE LA SOBRETENSION EN LOS DEVANADOS.
2. DESENERGIZACION	LINEAS AEREAS CABLES	COMO EN 1 ARRIBA-RECONEXION MULTIPLE DE LOS INTERRUPTORES.
	REACTORES EN PARALELO TRANSFORMADORES	DISIPACION DE LA ENERGIA ELECTROMAGNETICA ALMACENADA EN LA RED INDUCTIVA/CAPACITIVA.
	CAPACITORES	RECONEXION MULTIPLE CON EFECTOS DE CARGA ATRAPADA ACUMULATIVA, ESENCIALMENTE PROBLEMAS DE PARAMETROS CONCENTRADOS.
3. DESPEJE DE FALLAS SIMETRICAS O ASIMETRICAS.	CUALQUIER COMBINACION DE ELEMENTOS.	ONDAS VIAJERAS COMPUESTAS/RESPUESTA DE LOS PARAMETROS CONCENTRADOS DEL SISTEMA.

Cuando ocurre una operación de maniobra de interruptores o una descarga atmosférica que afecte al sistema, éstos elementos están sujetos a voltajes y corrientes que tienen un amplio rango de frecuencias el cual puede extenderse desde 50 Hz hasta 100 KHz, en éste rango los valores de los parámetros del sistema no permanecen constantes sino que varían con la frecuencia.

Idealmente, el método de cálculo usado debe ser tal que puedan representarse tanto los parámetros concentrados como los distribuidos así como la variación de sus valores con la frecuencia además de los efectos no lineales como aquellos causados por rayos, saturación magnética, el efecto corona y el arco de los interruptores. En la práctica, no es fácil el desarrollar un método de ésta naturaleza y los métodos comunmente usados representan un compromiso, en algún aspecto, determinado por los requerimientos específicos del usuario. Las dificultades que se presentan en el cálculo de transientes, no están confinadas unicamente al método empleado, también es de mucha importancia el disponer de todos aquellos datos del sistema que se requieren para el cálculo y que la exactitud de los mismos sea buena,

puesto que la exactitud de cualquier cálculo no puede ser mejor que la que tienen los datos en los cuales dicho cálculo se basa. El obtener los resultados más exactos requerirá un completo conocimiento de la variación de los elementos del circuito con la frecuencia y no siempre es posible obtener dicha información.

En ésta sección se discuten en forma muy breve los cuatro métodos principalmente usados en la predicción de sobrevoltajes transientes, estos son:

- a. Técnicas Analógicas
- b. Métodos de la transformada de Fourier.
- c. Método de Ondas viajeras.
- d. Método de Bergerón.

Los métodos b, c, y d, que son de naturaleza matemática, pueden ser adaptados a los requerimientos de un computador digital.

El principal inconveniente, común a todos los métodos de solución, es que en ninguno de ellos se puede

den simular directamente los parámetros reactivos concentrados y en cada caso es necesario realizar ciertas aproximaciones que pueden sin embargo ser controladas.

Para un tipo particular de problema, un método puede ser más adecuado que otro, por ejemplo, el método de Bergerón es más adecuado para el cálculo de voltajes y corrientes en varios puntos del sistema. Por otro lado, el método de ondas viajeras es más eficiente cuando se requieren los voltajes en uno o dos puntos de un sistema muy grande. Sin embargo una vez que se ha escogido un método particular de solución, se debe continuar el análisis con dicho método hasta concluirlo, es decir ninguno de estos métodos puede ser interconectados y debido a los factores económicos y de tiempo involucrados en la producción de un programa digital completo, no es práctico el intentar cambiar de método "a mitad de camino".

1.2.1. Analizador de Redes Transientes

El método tradicional para estimar la severidad de los fenómenos transientes en los sistemas de potencia, ha sido el uso del ana

lizador de redes transientes tipo de computadora analógica. Este tipo de computadora analógica usa modelos de los componentes del sistema para la representación de sus parámetros concentrados o distribuidos, es decir - se hace una representación de resistencia - por resistencia, inductancia por inductancia, capacitancia por capacitancia, de forma tal que las ecuaciones que gobiernan el sistema son formadas de manera automática cuando se ensambla el modelo a escala del sistema y no tienen que ser formalmente escritas.

Los parámetros distribuidos tales como las líneas aéreas de transmisión y cables son representados por líneas artificiales compuestas por un cierto número de secciones PI, según se ilustra en la figura 1.2.1.1, en teoría, una línea de transmisión consiste de un número infinito de tales secciones PI, por lo tanto, el número de secciones usadas en la práctica depende de la exactitud requerida.

Las ventajas que se tienen en el uso de los dispositivos analógicos son las siguientes:

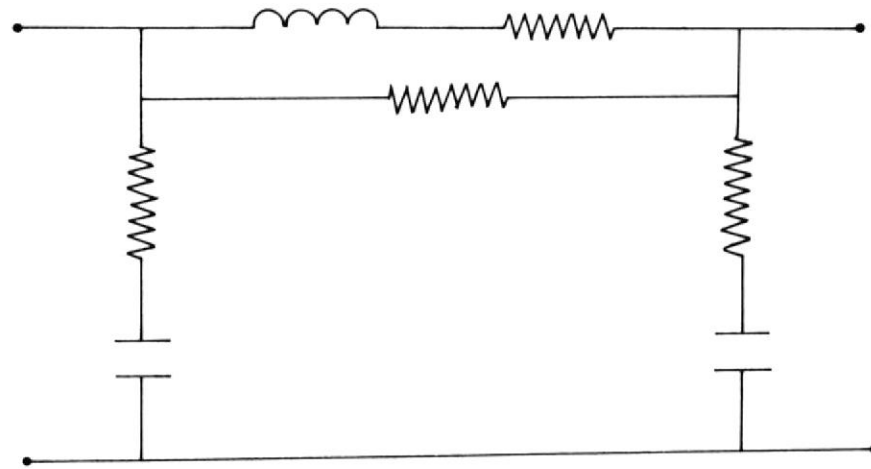


FIGURA 1.2.1.1. SECCION PI MONOFASICA COMPENSADA

- a. El analizador de redes transientes es un dispositivo de bajo costo, particularmente si está diseñado para ser variable y flexible.
- b. El modelo a escala tiene una relación física directa con el sistema de potencia que éste representa y uno puede identificar claramente los elementos correspondientes en ambas redes.
- c. La disponibilidad de todos los elementos facilita el realizar un examen inmediato de todas las posibilidades. En efecto, la principal ventaja del dispositivo es que permite llegar a un entendimiento de la respuesta del sistema, más bien que obtener una estimación de dicha respuesta que sea cuantitativamente exacta.
- d. La red puede seccionarse rápidamente con el objeto de investigar cuáles partes contribuyen significativamente al sobrevoltaje, lo cual es extremadamente útil durante el diseño o rediseño de la red.

e. Si los parámetros de la red no se conocen con exactitud, la manera sencilla de variarlos en la analogía es sumamente útil.

Las desventajas son las siguientes:

- a. No es posible obtener una respuesta completamente exacta debido a los errores inherentes en los parámetros, tal es el caso de la representación de las líneas.
- b. Dependiendo de los factores de escalamiento usados, la capacidad dispersa y la impedancia pueden afectar los resultados. Un diseño cuidadoso de la analogía virtualmente eliminará éstas fuentes de error, pero siempre es recomendable la verificación.
- c. La operación de interruptores nunca puede ser perfecta, sin embargo, de nuevo es relativamente fácil verificar su funcionamiento comparándolo con la respuesta teórica para un circuito simple.
- d. En el caso de sistemas muy grandes, por lo general las computadoras analógicas de

gran escala no están disponibles al usuario, por lo que la solución a los problemas transientes por medio de una computadora digital es de gran valor potencial.

- e. Una vez que se comienza el análisis de un sistema determinado, éste deberá concluirse para poder analizar otro sistema, lo cual puede tomar un tiempo considerable, de una a dos semanas, es decir la analogía trabajará para un sistema a la vez.

En general , las técnicas analógicas deben usarse con el objeto de obtener una mejor comprensión del problema a fin de enfocar el estudio hacia las áreas de mayor interés, las cuales deberán ser separadas para una investigación más detallada y de mayor exactitud numérica por medio de una computadora digital.

Una combinación de las facilidades analógicas y digitales puede ser extremadamente poderosa y para ser realistas, los dos métodos deben ser vistos como complementarios en lugar de competitivos.

1.2.2. Método de la Transformada de Fourier

La dependencia de los parámetros de un sistema con la frecuencia puede acomodarse usando métodos basados en la transformada de Fourier.

Fundamentalmente, el método requiere el cálculo de la respuesta del sistema sobre un amplio rango de frecuencias y el uso de la transformada inversa de Fourier para transformar la respuesta desde el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

Generalmente, el método puede tratar solamente sistemas lineales, pero para tales sistemas es de gran exactitud.

Se requieren una gran cantidad de cálculos y una considerable cantidad de datos del sistema.

Si $f(t) = 0$ para $t < 0$, es posible escribir:

$$f(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-(a + j\omega)t} dt \quad (1.2.2.1)$$

junto con su inversa:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_+(a + jw) e^{(a + jw)t} dw$$

$$t > 0 \quad (1.2.2.2)$$

$$0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_+(a + jw) e^{(a + jw)t} dw$$

$$t < 0 \quad (1.2.2.3)$$

Donde "a" es lo suficientemente grande para asegurar que la integral converge.

La sustitución $s = a + jw$ convierte la transformada de Fourier en la transformada de Laplace.

Para evaluar numericamente la ecuación 1.2.2.2 es necesario truncar el intervalo de integración $(-\infty, \infty)$ a un intervalo finito, digamos $(-\Omega, \Omega)$, desafortunadamente, esto da lugar a oscilaciones no deseadas equivalentes a las oscilaciones de Gibbs asociadas con las series de Fourier. Sin embargo, esto puede evitarse incluyendo en el integrando el factor -

sigma (σ).

$$\sigma = \frac{\text{sen}(\pi w/\Omega)}{\pi w/\Omega} \quad (1.2.2.4)$$

En general, la integración numéricas toma la forma:

$$f(t) = \frac{e^{at}}{2\pi} \int_{-\Omega}^{\Omega} f_+(a+jw)e^{jwt} \frac{\text{sen}(\pi w/\Omega)}{\pi w/\Omega} dw \quad (1.2.2.5)$$

Puesto que existen métodos más simples, cuya exactitud es aceptable en relación a la exactitud de los datos del sistema, se considera que la transformada de Fourier no es el método más adecuado para realizar estudios generales. Sin embargo, los defensores de las técnicas basadas en la transformada de Fourier estarán lógicamente en desacuerdo con lo anterior.

1.2.3. Método de Ondas Viajeras

El voltaje existente en un punto de una línea

a un tiempo t puede obtenerse sumando las ondas viajeras que han llegado a dicho punto en tiempos anteriores al tiempo t . Cuando las ondas llegan al extremo de una línea o a una unión de una línea con otras líneas o circuitos, las ondas viajeras sufren reflexiones y refracciones. La proporción en la cual las ondas incidentes, en un extremo o unión, se reflejan o refractan, está determinada por los coeficientes de reflexión y refracción; los cuales por el momento se mencionarán sin demostración.

El coeficiente de reflexión de voltaje K_r está dado por:

$$K_r = \frac{R_e - Z_o}{R_e + Z_o} \quad (1.2.3.1)$$

El coeficiente de refracción o de transferencia de voltaje K_t está dado por:

$$K_t = \frac{2 R_e}{R_e + Z_o} \quad (1.2.3.2)$$

Donde Z_0 es la impedancia característica de la línea sobre la cual la onda está viajando y R_e es la impedancia característica efectiva vista por la onda cuando ésta alcanza el extremo, R_e no es otra cosa que la combinación en paralelo de las impedancias de sobre tensión de todas las otras líneas y circuitos conectados a la unión. Así si una onda incidente de voltaje V llega a una unión, la onda reflejada estará dada por $K_r V$ y la onda transmitida por $K_t V$. Además, los coeficientes de reflexión y de transmisión están relacionados por la ecuación:

$$K_r = K_t - 1 \quad (1.2.3.3)$$

Debido a las reflexiones y refracciones, pueden generarse un gran número de ondas, Bewley (6) describe un método gráfico para llevar un archivo de la "historia" de estas ondas, haciendo posible el cálculo de las variaciones de voltaje con el tiempo en todos los puntos de una línea. Este método de solución de la ecuación de onda viajera se conoce como el

Método de Lattice, debido a su forma gráfica.

Posteriormente, Barthold y Carter en el año de 1961, McElroy (4) en el año de 1963, Bickford y Doepel en 1967, han usado el método - adaptándolo a una computadora digital para - la solución tanto de redes monofásicas como trifásicas. La aplicación de las computadoras digitales hacen al método practicable, - puesto que enfocado gráficamente la solución es extremadamente laboriosa e inmanejable.

En el método de Lattice todos los elementos son representados por líneas sin pérdidas es pecificadas en términos de sus longitudes e impedancias de sobretensión, es posible in cluir en la representación la atenuación y distorsión, en cuyo caso, las líneas deben ser especificadas con mayor detalle.

Para cada terminación y en todas las uniones de una línea con otras líneas o circuitos, se determinan los coeficientes de transferencia a partir de las impedancias de sobretensión de todas las líneas conectadas a esa unión.

Los cálculos se desarrollan por completo en el dominio del tiempo y es posible hacer un enfoque no gráfico del método, en éste caso se prescinde del diagrama enrejado como tal y éste se reemplaza por una tabla que varía con el tiempo conocida como la "Matriz Rama-Tiempo", para lo cual debe escojese un intervalo de tiempo γ conocido como el "Intervalo Básico de Tiempo" el cual es uno de los parámetros más importantes en el cálculo ya que éste determina tanto la exactitud en la representación del sistema como el tiempo de computadora requerido para el cálculo, en el caso de usarse una computadora digital.

Los tiempos de propagación de los cables y líneas que comprenden el sistema se determinan a partir de sus longitudes y velocidades de propagación, siendo expresados como múltiplos del "Intervalo Básico de Tiempo".

Los cálculos son efectuados, por conveniencia, en términos de voltajes solamente, por lo tanto cualquier corriente aplicada al sistema debe ser convertida en voltaje, multiplicando -

la corriente por la impedancia adecuada; un procedimiento similar se sigue cuando la corriente en cuestión es una variable de salida, en tal caso se debe dividir el voltaje por la impedancia adecuada.

Las formas de onda de los voltajes aplicados al sistema, se sintetizan dividiendo las ondas en intervalos de tiempo iguales al intervalo básico γ y aplicándolas al sistema en incrementos de voltajes por pasos, las diferencias de voltajes se producirán en cada intervalo de tiempo.

1.2.4. Método de Bergerón

El método de Bergerón en su forma básica se puede aplicar solamente a líneas ideales de parámetros constantes.

A partir de las ecuaciones generales de una línea de parámetros distribuidos (Fig.1.2.4.1.a) y considerando su representación como un cuadripolo (Fig.1.2.4.1.b), se puede deducir que las variables tensiones y corrien-

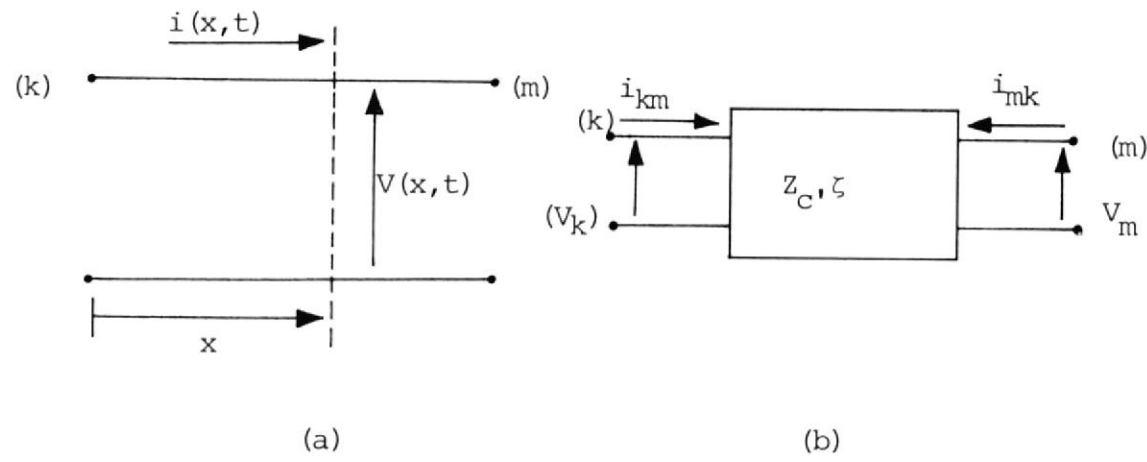


FIGURA 1.2.4.1. REPRESENTACIONES DE UNA LINEA MONOFASICA IDEAL DE PARAMETROS DISTRIBUIDOS

tes en los terminales (k) y (m) de la línea, están relacionadas por las siguientes ecuaciones:

$$V_k(t-\zeta) + Z_C \cdot i_{km}(t-\zeta) = V_m(t) - Z_C \cdot i_{mk}(t)$$

$$V_m(t-\zeta) + Z_C \cdot i_{mk}(t-\zeta) = V_k(t) - Z_C \cdot i_{km}(t)$$

(1.2.4.1)

Donde:

$Z_C = \sqrt{L/C}$ = Impedancia característica de la línea

ζ = Tiempo de tránsito de la línea

Las ecuaciones 1.2.4.1, son la base del método de Bergerón y ellas permiten representar a la línea como se muestra en la figura 1.2.4.2.

Las fuentes de corriente dependen del valor de las variables terminales en el tiempo $(t-\zeta)$:

$$I_{km}(t-\zeta) = -\{V_m(t-\zeta)/Z_C + i_{mk}(t-\zeta)\}$$

$$I_{mk}(t-\zeta) = -\{V_k(t-\zeta)/Z_C + i_{km}(t-\zeta)\} \quad (1.2.4.2)$$

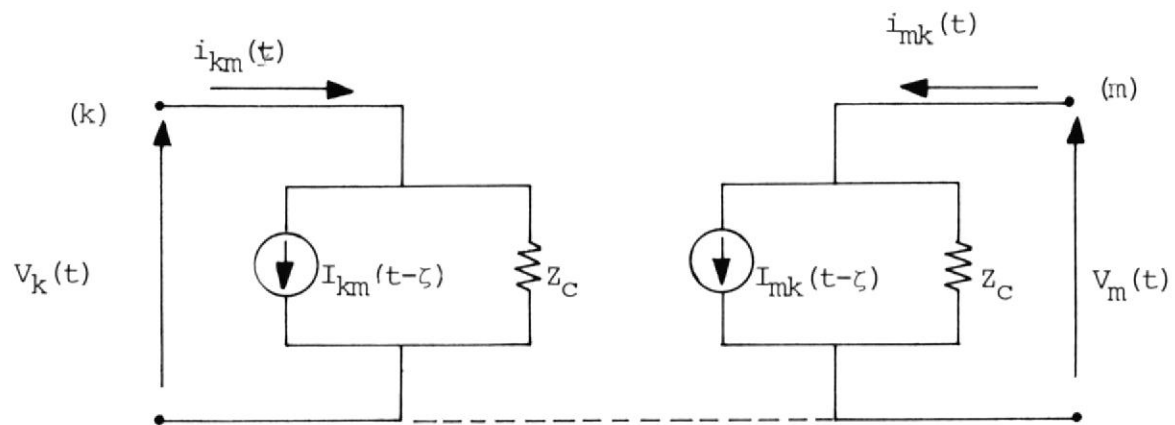


FIGURA 1.2.4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LINEA MONOFASICA IDEAL DE PARAMETROS DISTRIBUIDOS

Para evaluar en pasos discretos de tiempo las variables tensiones y corrientes asociadas a los elementos concentrados inductancias y capacidades, es necesario emplear algún procedimiento adecuado de integración numérica.

En particular, aplicando la regla trapezoidal, éstos elementos se pueden representar como se muestra en la figura 1.2.4.3, donde:

$$R = 2L/\Delta t, \text{ para una inductancia } L$$

$$R = \Delta t/2C, \text{ para una capacidad } C$$

$$\Delta t = \text{Intervalo de Integración}$$

$$I_{km}(t-\Delta t) = \pm 1/R(V_k(t-\Delta t) - V_m(t-\Delta t)) \pm i_{km}(t-\Delta t) \quad (1.2.4.3)$$

En la ecuación 1.2.4.3, el signo (+) corresponde al caso de una inductancia y el signo (-) al de una capacidad.

Combinando los circuitos equivalentes de líneas y elementos concentrados, se obtiene una red formada por elementos resistivos y fuentes

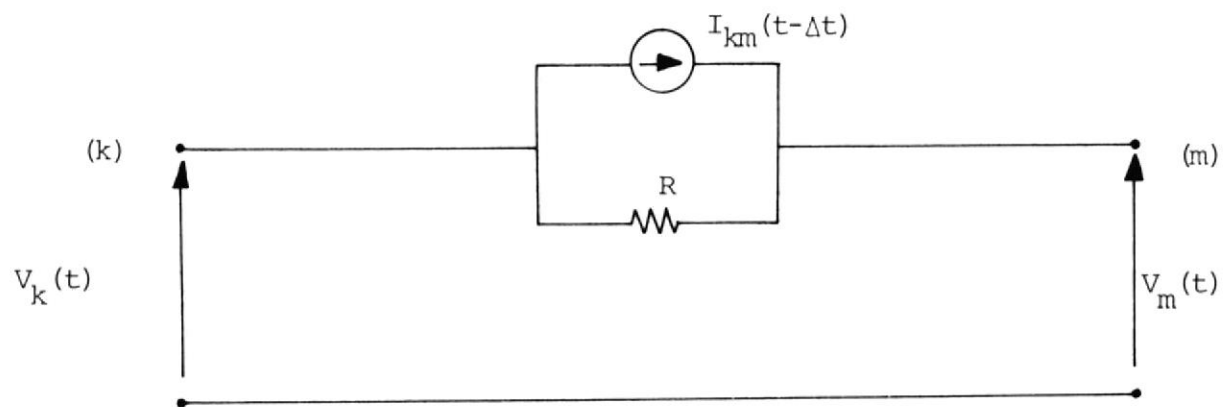


FIGURA 1.2.4.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN ELEMENTO CONCENTRADO

de corrientes a la cual resulta conveniente aplicar el método nodal, para una red de (n) nodos, se obtiene:

$$\{Y\} \bar{V}(t) = \bar{I}(t) - \bar{I} \quad (1.2.4.4)$$

Donde:

$\{Y\}$ = matriz de admitancias

$\bar{V}(t)$ = vector tensiones de nodos

$\bar{I}(t)$ = vector corrientes inyectadas en los no
dos.

\bar{I} = Vector fuentes de corrientes asociadas
a cada elemento.

A partir de la ecuación 1.2.4.4. y empleando cualquier método numérico eficiente, es posi
ble calcular las tensiones en los nodos de
interés, en intervalos discretos de tiempo.
En la solución de éste sistema, el establecimi
miento adecuado de las condiciones iniciales
juega un papel muy importante.

1.3. CALCULO DE TRANSIENTES ELECTROMAGNETICOS POR MEDIO DE UNA COMPUTADORA DIGITAL

Con el advenimiento de las computadoras, se hizo posible el realizar cálculos digitales de los transientes electromagnéticos, en lugar de usar técnicas analógicas. Por medio del uso de las computadoras digitales es posible realizar estudios transientes de grandes sistemas de potencia, el tamaño de los cuales se ve limitado solamente por la capacidad de memoria del computador usado.

Una de las ventajas del uso de las computadoras digitales, en comparación con los analizadores de redes, es la facilidad con la cual se pueden variar los parámetros del sistema bajo estudio. Otra de las ventajas grandes es el procesamiento estadístico automático de los resultados, eliminándose así el trabajo de examinar los oscilogramas que se obtienen cuando se usan los analizadores de redes transientes.

El principal problema en el uso de las computadoras digitales, para el cálculo de transientes, está en la necesidad de elaborar un programa digital que satisfaga las necesidades del usuario y efectúe los cálculos requeridos; la elaboración de tales pro-

gramas requiere en primer lugar el conocimiento del método mediante el cual se va a solucionar el problema, dicho método de solución muchas veces es simple en concepto, pero su adaptación a los requerimientos del computador resulta ser una tarea formidable, aún en los casos más simples, peor si se desea un programa digital completo y se tiene el gran inconveniente de no disponerse de una computadora con la capacidad de memoria suficiente para realizarlo, de aquí que casi siempre es necesario el uso de técnicas auxiliares de almacenamiento, tales como el uso de los archivos de disco, pero debido a la lógica de éstos programas, no siempre ésto es posible o la programación se hace sumamente compleja, de manera que las asunciones que simplifican el problema son prácticamente inevitables.

Las diferencias entre las soluciones digitales y analógicas se pueden producir principalmente por:

- a. Las ondas reales sufren una reducción en su pendiente conforme viajan, éste es un efecto acumulativo el cual atrasa los puntos en la curva analógica respecto a la solución digital.
- b. Los resultados analógicos incluyen algo de atenuación, lo que no sucede en la solución digital.

c. Las oscilaciones indebidas en el circuito analógico causan distorsiones que afectan los voltajes del sistema y ligeramente a las ondas de entrada.

A pesar de que todos los efectos anteriores están presentes en la realidad, a menudo es poco práctico el tratar de incluirlos con exactitud y en tales casos una solución idealizada es de interés primario.

1.4. OBJETIVOS DEL PRESENTE TRABAJO

En el presente trabajo, se desarrollan en forma detallada las bases teóricas del Método de Ondas Viajeras (Capítulo II) y del Método de Bergerón (Capítulo IV), aplicados al cálculo de sobretensiones de un sistema eléctrico de potencia. Empleando éstos métodos se desarrollan programas de computación para calcular sobretensiones transitorias en redes monofásicas.

Los programas elaborados permiten resolver problemas de sobretensiones en sistemas radiales o enmallados. Se describen las características más importantes de los programas y finalmente, se presentan resultados de su aplicación a problemas específicos, para comprobar su efectividad.

Algunas de las características generales de los programas desarrollados son:

- No se consideran las pérdidas en las líneas, distorsión, ni parámetros dependientes de la frecuencia.
- Las redes equivalentes del sistema eléctrico, pueden incluir parámetros concentrados lineales.
- Es posible simular diversos tipos de perturbación.
- Las variables tensiones y corrientes transitorias se obtienen como funciones discretas del tiempo.
- Los programas están escritos en lenguaje FORTRAN IV.

Se estima que el presente trabajo constituirá la base para extender los programas desarrollados a situaciones más complejas y de aplicación a los sistemas eléctricos nacionales.

CAPITULO II

METODO DE ONDAS VIAJERAS PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO UNA COMPUTADORA DIGITAL

2.1. CIRCUITOS CON PARAMETROS DISTRIBUIDOS

Es posible hacer el análisis de circuitos con parámetros concentrados, pero en la realidad los parámetros tales como resistencias, inductancias y capacidades, no existen en forma concentrada en ninguna sección de un circuito o parte de un equipo, por lo que puede parecer sorprendente la exactitud con la cual es posible estudiar el comportamiento transiente de los circuitos asumiendo parámetros concentrados.

Sin embargo, existen componentes importantes de un sistema de potencia para los cuales dicha asunción simplificatoria resulta excesiva, tal es el caso de las líneas de transmisión, cada metro de una línea de transmisión es semejante al siguiente cada uno con resistencia, capacitancia e inductancia, de manera que éstas constantes están en realidad distri-

buidas a lo largo de decenas y centenas de metros de línea.

Otro caso menos evidente es el de los devanados de las máquinas, así a un transformador se lo acostumbra a representar por una inductancia, algunas veces con capacitancia en sus terminales, tal representación es válida si se considera al transformador como un todo, como un componente de un circuito, pero si se estudian fenómenos que ocurren dentro del devanado, ésta representación ya no es válida puesto que la resistencia, inductancia y capacitancia deben considerarse entonces distribuidas a través de todo el devanado.

Una característica distintiva de los circuitos con parámetros distribuidos, es que éstos soportan o permiten la existencia de ondas viajeras de corrientes y voltajes. La manera como esto ocurre se considerará primeramente en forma cualitativa con el objeto de obtener una concepción física del fenómeno. Consideremos el circuito de dos hilos mostrado en la figura 2.1.1, al cerrar el interruptor S, la línea de transmisión se conecta a una fuente de voltaje e , por ahora asumida con impedancia interna nula.

La acción de cerrar el interruptor puede asemejarse

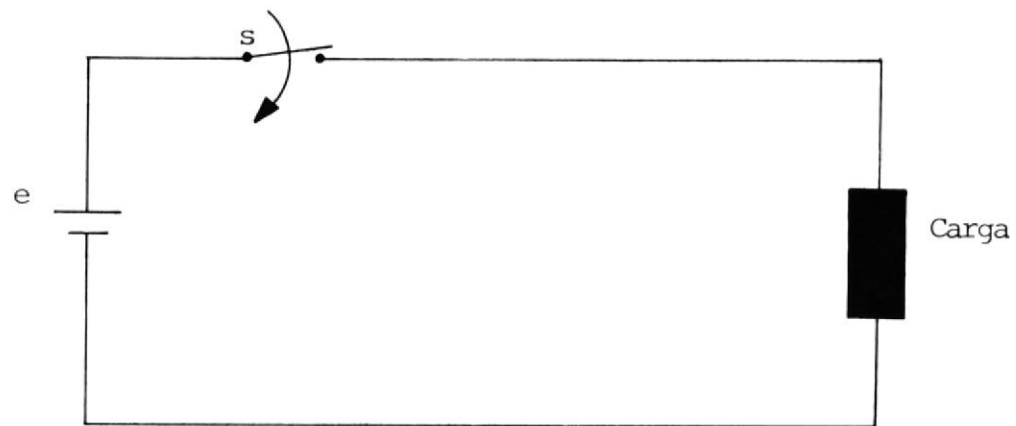


FIGURA 2.1.1. : LINEA DE TRANSMISION DE DOS HILOS

a abrir una válvula que permite la entrada de agua a un canal desde un reservorio situado atrás de éste, cuando se abre la válvula, el canal no se llena inmediatamente de agua, sino que se observarán ondas de agua moviéndose a través del canal, una sección del canal hacia adelante del frente de onda estará siempre seco, mientras que hacia atrás - de éste, el canal estará lleno de agua hasta donde lo permite su capacidad. Algo diferente ocurre - con el circuito de la figura 2.1.2, en donde la línea se ha dividido en gran número de secciones, cada una de las cuales está asociada con una cierta inductancia L y capacitancia C , concentradas.

Cuando se cierra el interruptor S_1 , la corriente comienza a fluir desde cero a través de la primera inductancia L_1 para cargar el capacitor C_1 , pero tan pronto como éste capacitor ha adquirido cierta carga, existe un voltaje aplicado a la siguiente sección de la línea y la corriente comienza a fluir a través de L_2 para cargar a C_2 , algo similar sucede con la tercera sección, la cuarta y así sucesivamente.

En un circuito concentrado como el de la figura 2.1.2, cualquier perturbación, no importa cuan pequeña

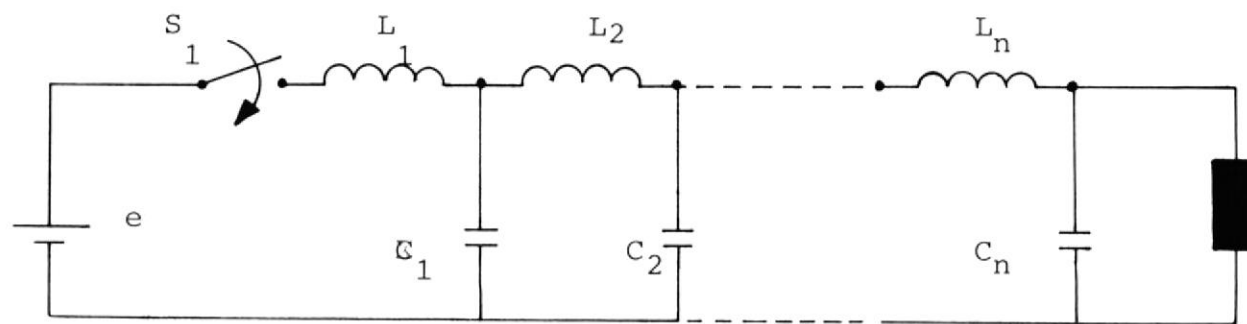


FIGURA 2.1.2. REPRESENTACION "CONCENTRADA" DE UNA LINEA DE DOS HILOS

ésta sea, es "sentida" por la n -ésima sección de la línea, en forma prácticamente instantánea cuando el interruptor S_1 se cierra.

En la figura 2.1.1, ésto no sucede así, la perturbación causada por el cierre del interruptor S , - viaja a lo largo de la línea con una velocidad finita y es detectada en puntos remotos luego de un intervalo finito de tiempo, determinado por la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el medio circundante de la línea.

Cuando no se hace la aproximación de considerar - concentrados los parámetros de las líneas, se deben abandonar ciertas nociones acostumbradas en el comportamiento de los circuitos; por ejemplo, la idea de que la corriente es la misma en todos los puntos de un circuito, tal como el de la figura 2.1.1, y que el voltaje no puede ser discontinuo. Tales conceptos no se aplican en la teoría de líneas de transmisión. Al analizar lo que sucede cuando se cierra el interruptor S , resulta conveniente visualizar los eventos desde el punto de vista de los campos. Cuando se energiza el circuito comienza a fluir corriente desde la fuente hacia la línea, cargando su capacitancia hasta que ésta adquiere el voltaje de la fuente.

Asumiendo que luego de un tiempo Δt , ha sido cargada una longitud de Δx metros de línea y si la capacitancia de la línea es de C faradios por metro, una carga de:

$$\Delta Q = Ce\Delta x \quad (2.1.1.)$$

habrá sido impartida a la línea. En consecuencia se crea un campo eléctrico entre los conductores de los primeros Δx metros de la línea y un campo magnético en el medio circundante de los mismos, en virtud de la corriente que por ellos circula, dicha corriente está dada por:

$$i = \Delta Q / \Delta t \quad (2.1.2)$$

De acuerdo a la ecuación 2.1.1:

$$i = Ce \Delta x / \Delta t \quad (2.1.3)$$

En el límite:

$$i = Ce \quad dx/dt \quad (2.1.4)$$

Ahora, dx/dt es la velocidad con la cual la perturbación se propaga a lo largo de la línea, llamando v a ésta velocidad, se tiene:

$$i = Cev \quad (2.1.5)$$

El progresivo establecimiento del flujo magnético enlazando las líneas significa que una fuerza electromotriz, igual a la razón de cambio de los enlaces de flujo, se induce en el lazo formado por los conductores y el frente de onda. Suponiendo que la línea tiene una inductancia de L henrios por metro, cuando la corriente ha penetrado Δx metros, los enlaces de flujo $\Delta\emptyset$ están dados por:

$$\Delta\emptyset = L\Delta xi \quad (2.1.6)$$

de acuerdo a la ecuación 2.1.5, podemos escribir:

$$\Delta\emptyset = L\Delta x Cev \quad (2.1.7)$$

y la fuerza electromotriz es:

$$\Delta\emptyset/\Delta t = LCev\Delta x/\Delta t \quad (2.1.8)$$

en el límite:

$$d\phi/dt = LCe v \quad dx/dt \quad (2.1.9)$$

de donde:

$$e = LCe v^2 \quad (2.1.10)$$

$$v = 1/(LC)^{1/2} \quad (2.1.11)$$

La velocidad de propagación de las ondas de corriente y voltaje a lo largo de la línea, depende de la geometría de la línea y de las propiedades electromagnéticas del medio circundante, puesto que estos factores afectan a L y C. Ahora, si el espaciamiento d entre las líneas es grande comparado con el radio r de los conductores, se puede desprestigiar el flujo dentro de los mismos y una buena aproximación para la inductancia sería:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{d}{r} \quad \text{H/m} \quad (2.1.12)$$

Bajo las mismas asunciones, la capacitancia estaría dada por:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{d}{r}} \quad \text{F/m} \quad (2.1.13)$$

de las ecuaciones 2.1.12 y 2.1.13, se tiene:

$$LC = \mu_0 \epsilon_0$$

reemplazando en la ecuación 2.1.11:

$$v = 1/(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2} \quad (2.1.14)$$

La ecuación 2.1.14, nos da la velocidad de las ondas electromagnéticas en el espacio libre, es decir, la velocidad de la luz, usualmente designada por c y que es independiente de la geometría de la línea.

En realidad, L y C son algo mayores que las aproximaciones hechas en 2.1.12 y 2.1.13, de manera que v es algo menor que c .

En algunos casos prácticos el medio ambiente no es el espacio libre o el aire; por lo tanto la velocidad de propagación es diferente. Por ejemplo, en un cable la permitividad del dieléctrico es $k\epsilon_0$, donde k puede ser de 3 a 5 o mayor y v se ve reducida en un factor de $1/k^{1/2}$, pudiendo llegar a ser menor que la mitad de la velocidad para una línea aérea.

Similarmente, cuando un conductor se devana en acero,

como sucede con los conductores de la mayoría de las máquinas rotativas, la permeabilidad μ puede ser mucho mayor que μ_0 , esto afectará a la velocidad en la razón $(\mu_0/\mu)^{1/2}$, una vez que el flujo ha penetrado en el acero.

La ecuación 2.1.5 puede ser escrita de la forma:

$$i = Ce/(LC)^{1/2}$$

de donde:

$$e/i = (L/C)^{1/2} \quad (2.1.15)$$

La ecuación 2.1.15, expresa la razón de las amplitudes de las ondas de corriente y voltaje, tiene por lo tanto dimensiones de impedancia y se designa como la impedancia característica de la línea Z , es decir:

$$Z = (L/C)^{1/2} \quad (2.1.16)$$

A diferencia de la velocidad v , la impedancia característica claramente depende de la geometría de la línea. Para una línea aérea, Z es aproximadamente 400Ω y para un cable, está en el rango de $30-80 \Omega$,

ya que el menor espaciamiento aumenta el valor de C y disminuye el de L , además la capacitancia se ve aumentada por la mayor permitividad del dieléctrico del cable.

Resumiendo, podemos decir que cuando una línea se conecta a una fuente de energía eléctrica, una onda -viajera de voltaje pasa a lo largo de la línea, estableciendo un campo eléctrico entre los conductores. La onda de voltaje está acompañada por una onda de corriente de amplitud V/Z , la que a su vez crea un campo magnético en el espacio circundante. Es evidente que se le está suministrando energía a la línea a una tasa de ei watts, en ausencia de pérdidas esta energía debe ser almacenada en el campo electromagnético, se puede demostrar fácilmente que la energía -se distribuye por igual en el campo eléctrico y en el campo magnético.

Al campo eléctrico se le administran $1/2 C e^2 v$ watts y al campo magnético $1/2 L i^2 v$ watts, reemplazando en éstas expresiones las ecuaciones 2.1.11 y 2.1.15, ambas se reducen a $1/2 ei$. De manera que el fenómeno puede ser visto como una onda de energía que viaja a lo largo de la línea.

2.2. LA ECUACION DE ONDA Y SOLUCIONES DE D'ALEMBERT

Se ha analizado lo que sucede cuando una línea de dos hilos se conecta a una fuente de voltaje, las ideas anteriormente expuestas se formalizarán mediante el desarrollo de la ecuación de onda. Se demostrará que cualquier sistema de cargas libres de forma arbitraria, que se encuentra sobre una línea de transmisión, debe viajar a lo largo de la línea.

Consideremos nuevamente una línea de dos hilos, sin pérdida, el incluir la resistencia y la dispersión complica mucho el álgebra sin aclarar el problema.

En la figura 2.2.1, se muestra un pequeño elemento de una línea de transmisión, si dicha línea tiene una inductancia de L henrios por metro y una capacitancia de C faradios por metro, una longitud elemental de Δx metros tendrá una inductancia de $L\Delta x$ y una capacitancia de $C\Delta x$. El voltaje a través de éste elemento será:

$$-\Delta e = L\Delta x \partial i / \partial t$$

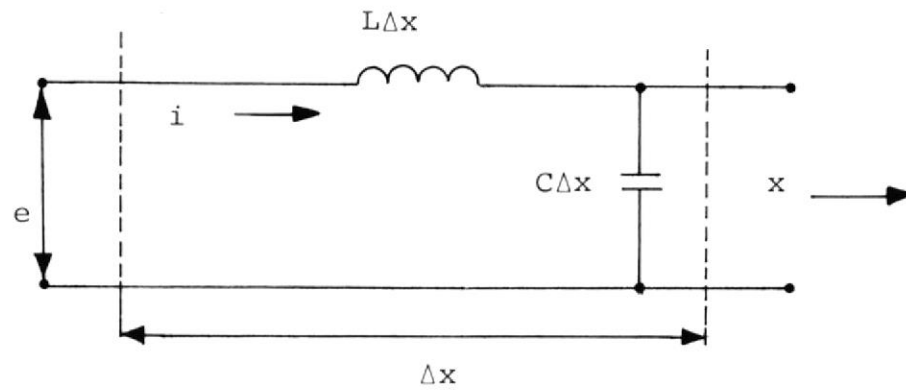


FIGURA 2.2.1. PEQUEÑO ELEMENTO DE UNA LINEA DE TRANSMISION

en el límite, cuando la longitud del elemento se hace dx , se puede escribir:

$$\partial e / \partial x = -L \partial i / \partial t \quad (2.2.1)$$

Se deben usar derivadas parciales puesto que tanto e como i son funciones de la posición y del tiempo. La corriente necesaria para cargar la capacitancia elemental $C \Delta x$, está dada por:

$$-\Delta i = C \Delta x \partial e / \partial t$$

la cual en el límite se convierte en:

$$\partial i / \partial x = -C \partial e / \partial t \quad (2.2.2)$$

Los signos negativos en las ecuaciones 2.2.1 y 2.2.2, se deben a que con la corriente fluyendo en la dirección indicada en la figura 2.2.1, tanto e como i disminuyen con el aumento de x . Ahora, podemos eliminar i del par de ecuaciones simultáneas, diferenciando la ecuación 2.2.1, respecto a x y la ecuación 2.2.2, respecto a t , nos queda:

$$\partial^2 e / \partial x^2 = -L \partial^2 i / \partial x \partial t$$

$$\partial^2 i / \partial x \partial t = -C \partial^2 e / \partial t^2$$

Eliminando $\partial^2 i / \partial x \partial t$ de las ecuaciones anteriores, obtenemos:

$$\partial^2 e / \partial x^2 = LC \partial^2 e / \partial t^2 \quad (2.2.3)$$

De igual manera podemos eliminar e , diferenciando la ecuación 2.2.1, respecto a t y la ecuación 2.2.2., respecto a x , nos queda:

$$\partial^2 e / \partial t \partial x = -L \partial^2 i / \partial t^2$$

$$\partial^2 i / \partial x^2 = -C \partial^2 e / \partial t \partial x$$

eliminando $\partial^2 e / \partial t \partial x$ de las ecuaciones anteriores, obtenemos:

$$\partial^2 i / \partial x^2 = LC \partial^2 i / \partial t^2 \quad (2.2.4)$$

Las ecuaciones 2.2.3 y 2.2.4 constituyen las ecuaciones de onda para una línea de transmisión sin pérdidas, es posible resolverlas en dos pasos por medio de la transformada de Laplace, pero simplemente afirmaremos que la solución de la ecuación de voltaje, dada por D'Alembert, es de la forma:

$$e = f(x \pm t / (LC)^{1/2}) \quad (2.2.5)$$

o de manera alternativa:

$$e = f(t \pm (LC)^{1/2}x) \quad (2.2.6)$$

Observamos que $(LC)^{-1/2}$ es una velocidad, de manera que, dimensionalmente la ecuación 2.2.5, establece que e es una función del espacio, mientras que la ecuación 2.2.6, establece que e es una función del tiempo. Estas ecuaciones son diferentes pero constituyen medios equivalentes para la descripción del mismo fenómeno. Una de ellas es útil si fijamos nuestra atención en un punto particular determinando la variación del voltaje como una función del tiempo, la otra se aplica cuando nos interesa el observar todos los puntos a un tiempo determinado.

Reescribiendo la ecuación 2.2.5, en términos de v , se tiene:

$$e = f_1(x + vt) + f_2(x - vt) \quad (2.2.5.a)$$

Es posible demostrar que la ecuación anterior es solución de la ecuación de onda por sustitución, diferenciándola dos veces, primero respecto a x y luego respecto a t .

Debemos observar que acerca de las funciones de x y t no se ha especificado nada, excepto el hecho de que tienen que ser diferenciables.

Consideremos la función $f_1(x + vt)$, al tiempo $t=0$, ésta tiene una distribución espacial $f_1(x)$ y un valor de $f_1(a)$ para $x = a$. A cualquier tiempo subsecuente γ , ésta tiene el mismo valor para $x = (a - v\gamma)$ que aquel valor que tuvo para $x = a$, es decir que la distribución de voltaje se ha movido intacta una distancia $v\gamma$ en la dirección de menos x , esto se ilustra en la figura 2.2.2.

De manera similar, la función $f_2(x - vt)$ representa una distribución de voltaje moviéndose en la dirección positiva de x con una velocidad v . Concluimos que para satisfacer la ecuación de onda, cualquier sistema de cargas libres formando una distribución de voltaje, debe viajar a lo largo de la línea con una velocidad $v = (LC)^{-1/2}$.

Las ondas de corriente implícitas por el movimiento de carga y que por lo tanto acompañan a las ondas de voltaje, pueden ser derivadas de la ecuación 2.2.1:

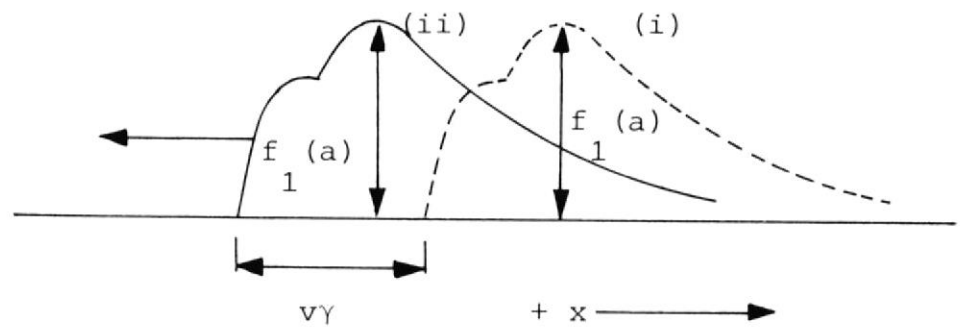


FIGURA 2.2.2: LA FUNCION $f_1(x + vt)$ a (i) $t=0$ y (ii) $t = \gamma$

$$\partial i / \partial t = -(1/L) \partial e / \partial x$$

$$\partial i / \partial t = -(1/L) \{ f_1' (x + vt) + f_2' (x - vt) \} \quad (2.2.7)$$

Las funciones $f_1' (x + vt)$ y $f_2' (x - vt)$, son derivadas respecto a las variables enteras $f_1(x + vt)$ y $f_2(x - vt)$. Integrando ambos lados de la ecuación 2.2.7, respecto a t , obtenemos:

$$i = -(1/Lv) \{ f_1(x + vt) - f_2(x - vt) \}$$

$$i = (C/L)^{1/2} \{ f_2(x - vt) - f_1(x + vt) \}$$

$$i = (1/Z) \{ f_2(x - vt) - f_1(x + vt) \} \quad (2.2.8)$$

La ecuación 2.2.8, establece que las ondas de corriente son directamente proporcionales a las ondas de voltaje, el factor de proporcionalidad es la impedancia característica.

Sin embargo, notamos que la onda de corriente que viaja en la dirección negativa de las x tiene signo opuesto al de la onda de voltaje.

Resumiendo, hemos llegado a la importante conclusión de que en líneas de transmisión sin pérdidas, las ondas de corriente y voltaje tienen la misma forma, están relacionadas por la impedancia característica de la línea y viajan sin distorsionarse. Una onda de corriente viajando en la dirección arbitrariamente escogida como positiva de x , tiene el mismo signo que la onda de voltaje con la cual está asociada. Las ondas de corriente que viajan en dirección opuesta tienen un signo contrario al de las ondas de voltaje relacionadas.

En la figura 2.2.3, se muestran algunas combinaciones de las ondas de corriente y voltaje, observamos que i y e tienen el mismo signo cuando viajan hacia la derecha y signos opuestos cuando viajan hacia la izquierda. La figura 2.2.3.c, muestra una onda de corriente negativa viajando en la dirección negativa, mientras que la figura 2.2.3.d, muestra una onda de corriente positiva viajando en ésta dirección.

Cuando dos ondas que viajan en direcciones opuestas se encuentran ellas se suman algebraicamente conforme pasan una a través de la otra, esto se ilustra - en la figura 2.2.4.

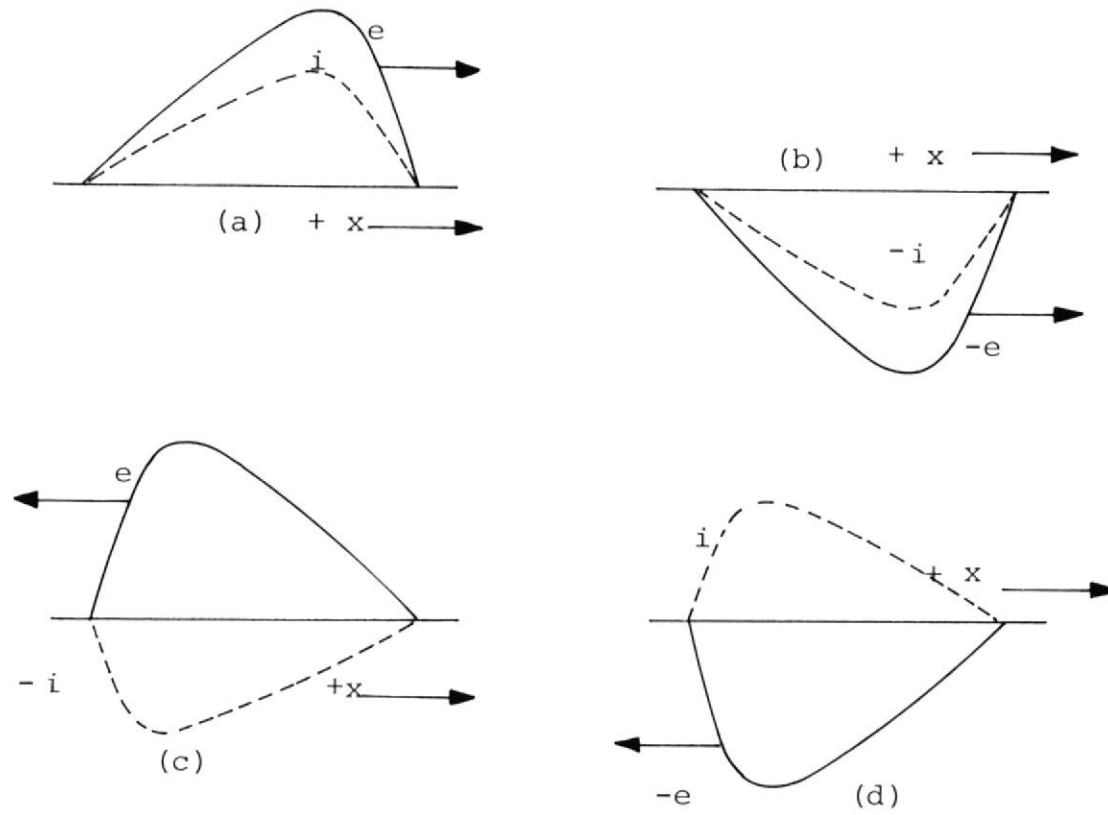


FIGURA 2.2.3: VARIAS COMBINACIONES DE LAS ONDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE

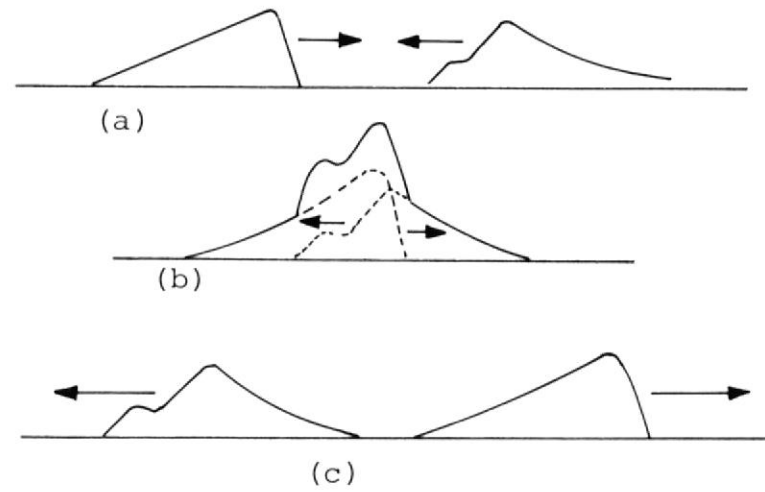


FIGURA 2.2.4. ONDAS OPUESTAS (a) APROXIMANDOSE, (b) COMBINANDOSE, y (c) ALEJANDOSE

2.3. REFLEXION Y REFRACCION DE ONDAS

Se ha visto que existe una estricta proporcionalidad entre las ondas de voltaje, que viajan a lo largo de una línea de transmisión, y sus ondas de corriente - asociadas. El factor de proporcionalidad es la impedancia característica Z de la línea. Cuando una onda llega a una discontinuidad, donde cambia la impedancia característica de la línea, debe ocurrir algún tipo de ajuste a fin de que dicha proporcionalidad no sea violada. Este ajuste se manifiesta por la iniciación de dos nuevos pares de ondas, la onda reflejada de voltaje y su acompañante onda de corriente viajan de regreso, hacia atrás, en la línea y se superponen a las ondas incidentes.

Las ondas refractadas penetran en la discontinuidad y continúan su viaje hacia adelante en la línea. Las amplitudes de las ondas reflejadas y refractadas son tales que se mantiene la proporcionalidad, entre el voltaje y la corriente para cada caso, de acuerdo a las impedancias características de las líneas sobre las cuales éstas ondas están viajando; las corrientes y voltajes en la discontinuidad de la línea son por si mismas continuas y se conserva la energía.

Consideremos la unión entre líneas de impedancias ca

racterísticas Z_A y Z_B , y supongamos que $Z_A > Z_B$. Por ejemplo éste puede ser el caso de una unión entre una línea aérea y un cable. Supongamos que un sobrevoltaje del tipo escalón y de amplitud e_1 se aproxima a la unión viajando sobre la línea aérea. La onda de corriente tendrá la misma forma y una amplitud:

$$i_1 = e_1/Z_A \quad (2.3.1)$$

Llamémos a las ondas de voltaje reflejadas y refractada e_2 y e_3 , respectivamente, de manera que sus corrientes asociadas serán:

$$i_2 = -e_2/Z_A \quad (2.3.2)$$

$$i_3 = e_3/Z_B \quad (2.3.3)$$

Nótese que i_2 está viajando en la dirección negativa de las x , por lo tanto tienen signo opuesto a e_2 . Si el voltaje y la corriente deben ser contínuos en la unión, se debe cumplir que:

$$e_1 + e_2 = e_3 \quad (2.3.4)$$

$$i_1 + i_2 = i_3 \quad (2.3.5)$$

La ecuación 2.3.5, puede reescribirse sustituyendo las ecuaciones 2.3.1 a 2.3.3:

$$e_1/z_A - e_2/z_A = e_3/z_B \quad (2.3.6)$$

A partir de las ecuaciones 2.3.4 y 2.3.6 es posible escribir expresiones para las ondas reflejada y refractada en términos de la onda siguiente:

$$e_2 \frac{z_B + z_A}{z_A z_B} = e_1 \frac{z_B - z_A}{z_A z_B}$$

$$e_2 = \frac{z_B - z_A}{z_B + z_A} e_1 \quad (2.3.7)$$

La cantidad $\{(z_B - z_A)/(z_B + z_A)\}$ se conoce como el coeficiente de reflexión y lo designaremos por K_r . El valor de K_r puede ser positivo o negativo dependiendo de los valores relativos de z_A y z_B . En el ejemplo anterior, K_r es negativo.

El coeficiente de refracción se lo obtiene eliminando e_2 entre las ecuaciones 2.3.4 y 2.3.6.

$$e_3 \frac{Z_B + Z_A}{Z_B Z_A} = 2/Z_A e_1$$

$$e_3 = \frac{2Z_B}{Z_B + Z_A} e_1 \quad (2.3.8)$$

Esto define el coeficiente de refracción o de transmisión que designaremos por $K_t = 2Z_B/(Z_B + Z_A)$, el cual varía entre cero y dos, dependiendo de los valores relativos de Z_A y Z_B .

Lo que anteriormente se ha descrito en forma matemática, se lo ilustra en la figura 2.3.1.

Supongamos que $Z_A = 400\Omega$, $Z_B = 50\Omega$ y que $e_1 = 300$ Kv, entonces $i_1 = 750$ A. Los coeficientes de reflexión y de refracción son -0.78 y 0.22 , respectivamente. Así, las ondas que penetran en el cable tienen un voltaje de 66 Kv y una corriente de 1320 A. La acentuada reducción de la onda incidente de voltaje, conforme ésta penetra en el cable, se utiliza algunas veces en sistemas de potencia para proteger los equipos terminales de las sobretensiones que se aproximan a ellos

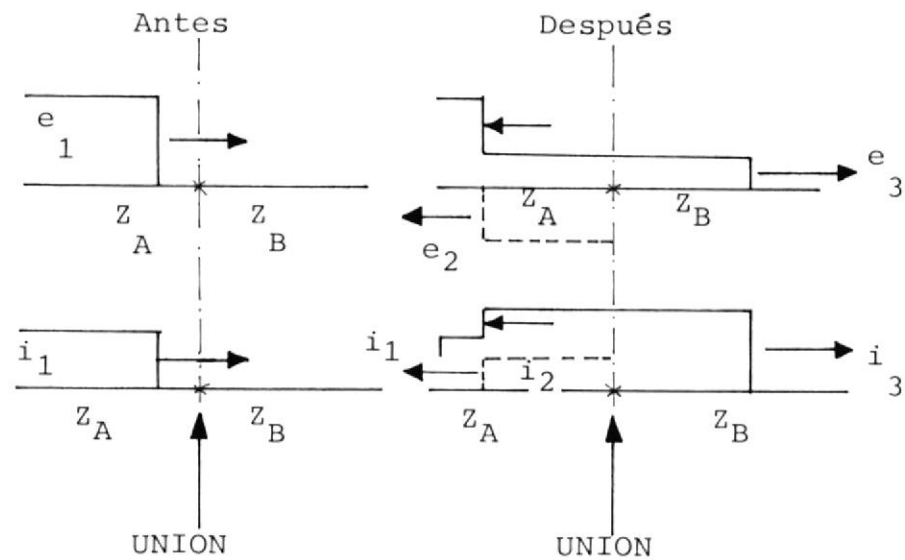


FIGURA 2.3.1. ONDAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE REFLEJADAS Y REFRACTADAS EN LA UNION ENTRE DOS LINEAS.

viajando por las líneas. Se introduce una sección de cable entre la línea aérea y el equipo terminal.

Se puede demostrar que la energía se conserva por la iniciación de las ondas secundarias, cuando la onda incidente alcanza la unión, de una manera bastante simple. Supongamos que la onda incidente fue la consecuencia del cierre de un interruptor que conecta la línea A a una fuente de e_1 voltios. La fuente alimentará a la línea a razón de:

$$i e_{11} = e_1^2 / Z_A \quad \text{watts} \quad (2.3.9)$$

hasta que llegue a la fuente una onda reflejada desde la discontinuidad. Cuando la onda incidente llega a la unión, llega energía a razón de e_1^2 / Z_A watts a la discontinuidad.

Esta energía se reparte desde la unión por medio de las ondas reflejada y refractada a razón de:

$$\frac{e_2^2}{Z_A} + \frac{e_3^2}{Z_B} \quad \text{watts} =$$

$$e_1^2 \left[\frac{1}{Z_A} \frac{(Z_B - Z_A)^2}{(Z_B + Z_A)^2} + \frac{1}{Z_B} \frac{(2Z_B)^2}{(Z_B + Z_A)^2} \right] \text{ watts}$$

$$= \frac{e_1^2}{Z_A} \left[\frac{(Z_B - Z_A)^2}{(Z_B + Z_A)^2} + \frac{4Z_A Z_B}{(Z_B + Z_A)^2} \right] \text{ watts}$$

$$= e_1^2 / Z_A$$

De manera que, las ondas reflejada y refractada tienen la misma energía que la onda incidente, dada por la ecuación 2.3.9.

Se ha considerado lo que sucede cuando una onda que viaja a lo largo de una línea de transmisión llega a un punto en el cual la línea se une a una segunda línea, con diferente impedancia característica. Todo lo dicho anteriormente se aplica a un punto en el cual la línea se une a otras dos o más líneas.

Una bifurcación de éste tipo se muestra en la figura 2.3.2, en la cual sólo se representan las ondas de voltaje.

En la situación general donde una línea se divide en

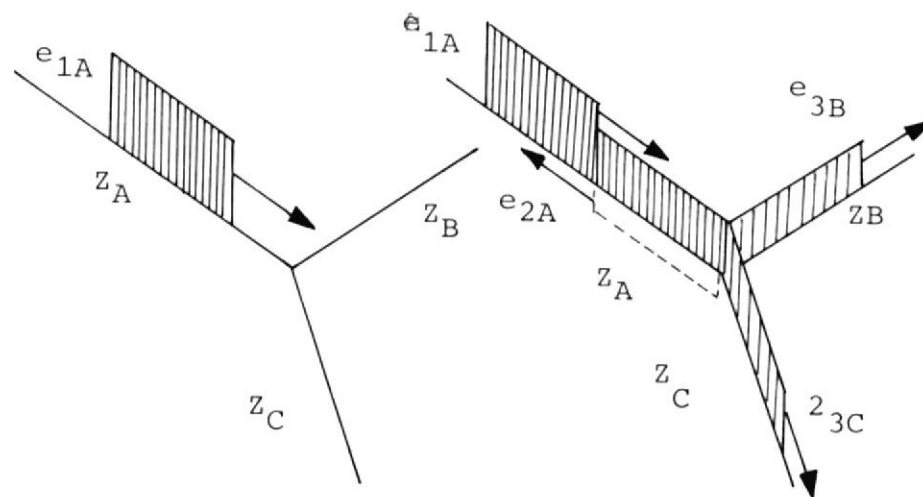


FIG. 2.3.2. ONDAS VIAJERAS DE VOLTAJE EN LA BIFURCACION DE UNA LINEA

otras n líneas, para las ondas refractadas, se tiene:

$$i_{3B} = e_{3B}/z_B, i_{3C} = e_{3C}/z_C, \dots, i_{3N} = e_{3N}/z_N \quad (2.3.10)$$

para la onda reflejada:

$$i_{2A} = -e_{2A}/z_A \quad (2.3.11)$$

por la continuidad de voltaje:

$$e_{1A} + e_{2A} = e_{3B} = e_{3C} = \dots = e_{3N} \quad (2.3.12)$$

y por la continuidad de corriente:

$$i_{1A} + i_{2A} = i_{3B} + i_{3C} + \dots + i_{3N} \quad (2.3.13)$$

Las ecuaciones 2.3.10 a 2.3.13, son suficientes para especificar la onda reflejada y todas las ondas refractadas en términos de la onda incidente e_{1A} y las impedancias características de las líneas. Otro tipo obvio de discontinuidad es la terminación de una línea, la cual, en cuanto a la impedancia, puede cubrir una gama entera desde el cortocircuito -

hasta el circuito abierto, algunas de éstas terminaciones se discuten en el Apéndice A: "Comportamiento de Ondas Viajeras en las Terminaciones de Líneas".

2.4. REDUCCION DE LA RED ELECTRICA

Los principios generales descritos anteriormente, pueden usarse en el desarrollo de un programa de computadora para el cálculo de sobretensiones en redes monofásicas, se considerará a continuación la técnica mediante la cual es posible adaptar el Método de Ondas Viajeras a los requerimientos de una computadora digital y mediante un ejemplo se ilustrará la lógica empleada en el programa.

En el análisis siguiente, el tiempo se expresa como un múltiplo de un intervalo básico de tiempo γ , el cual no varía a través de todo el análisis. Por lo tanto, para una línea uniformemente distribuida, con velocidad de propagación constante, el tiempo de tránsito de la línea (longitud de la línea dividida para la velocidad de propagación de las ondas en la línea) debe ser un múltiplo entero de γ .

Las redes eléctricas monofásicas pueden ser expresadas en términos de Líneas Finitas, Líneas Semi-infinitas y Coeficientes de Transferencia. Lo anterior es verdadero para redes eléctricas lineales ya sea que éstas incluyan elementos concentrados y distribuidos. A continuación se darán las definiciones correspondientes.

2.4.1. Líneas Finitas

Una línea finita se define como una línea - sin pérdidas, de dos pares de terminales, con impedancia característica Z y un tiempo de tránsito $\zeta = n \gamma$, donde n es un entero positivo. Una línea de éste tipo se la representa en la figura 2.4.1.1, por medio de una rama de dos terminales, se asume por lo tanto, un nivel de referencia común, tal como tierra.

Los terminales 1 y 2 se conocen como los no dos 1 y 2 respectivamente. La rama 1,2 (que también puede ser llamada la rama 2,1) tiene una impedancia característica $Z_{12} = Z_{21}$ y un tiempo de tránsito de $n_{12}\gamma = n_{21}\gamma$.

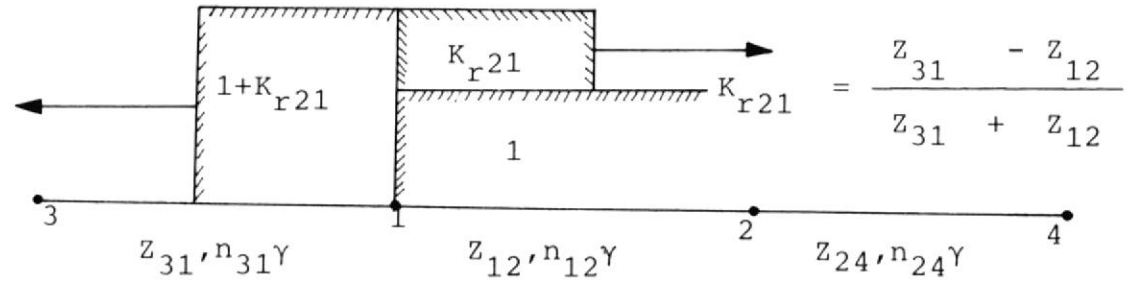


FIGURA 2.4.1.1. LINEA FINITA

Una onda del tipo escalón unitario que entre a la rama 1,2 por el nodo 2, llegará sin distorsión al nodo 1, n_{12} γ unidades de tiempo más tarde. Lo anterior es también verdadero, pero invertido, para una orden escalón unitario que entre a la rama 1,2 por el nodo 1.

La figura 2.4.1.1, muestra a la rama 3,1 conectada directamente a la rama 1,2 en el nodo 1, éste enlace directo se especifica por medio del numeral 1, el cual es común a ambas notaciones de rama. Una onda escalón unitario viajando en la rama 1,2, generará al llegar al nodo 1, una onda reflejada de voltaje de magnitud K_{r21} que viajará de regreso hacia el nodo 2, también generará una onda transmitida de voltaje de magnitud $1 + K_{r21}$ que viajará en la rama 3,1 hacia el nodo 3. Lo mismo se aplica, pero con diferentes valores de K_r , a las ramas 1,2 y 2,4 que están directamente conectadas en el nodo 2. En general, K_{r12} no es igual a K_{r21} .

2.4.2. Líneas Semi-infinitas

Una línea semi-infinita se define como una lí

nea de transmisión de un par de terminales y de impedancia característica R . Esta es in finita en longitud y recibe la inyección de energía a través del par de terminales en uno de sus extremos, una línea de éste tipo se representa en la figura 2.4.2.1, por medio de una rama semi-infinita de un terminal, la rama 1,0 (el 0 está representado por una pun ta de flecha). La rama 2,1 se muestra direc tamente conectada a la rama 1,0.

Una onda escalón unitario de voltaje que viaje en la rama 2,1, desde el nodo 2 hacia el nodo 1, al llegar al nodo 1, generará una onda reflejada de magnitud K_{r21} y que viajará de regreso hacia el nodo 2; generará también una onda transmitida de voltaje de magnitud $1 + K_{r21}$, que viajará en la rama 1,0. Una vez que la onda transmitida comienza su via je en la rama 1,0, ninguna parte de ésta onda regresa nunca al nodo 1.

Por lo tanto, se puede usar una línea semi-infinita para representar por ejemplo una resistencia conectada entre la línea y tie rra.

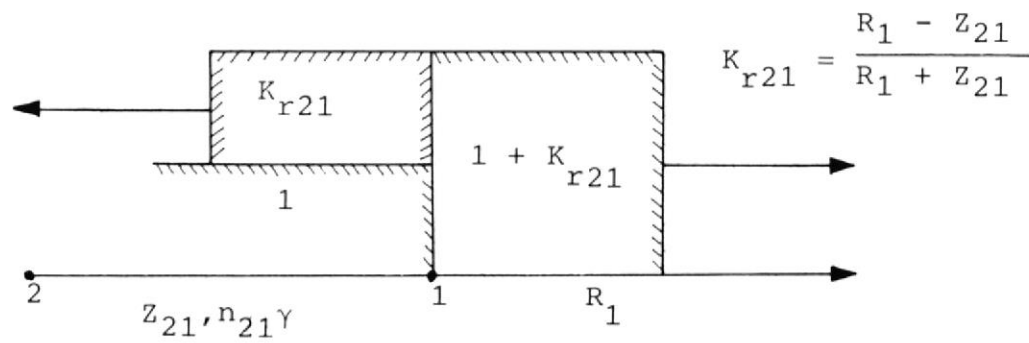


FIGURA 2.4.2.1. LINEA SEMI-INFINITA

2.4.3. Coeficientes de Transferencia

Un coeficiente de transferencia se define en la figura 2.4.3.1, como un factor C y describe el tiempo instantáneo de propagación de una onda desde un nodo hacia otro.

Por ejemplo, una onda escalón unitario de voltaje que viaje en la rama 3,1, al llegar al nodo 1, generará una onda reflejada de magnitud K_{r31} y una onda transmitida de magnitud $1 + K_{r31}$, en el nodo 1, además ésta puede generar ondas transmitidas en cualquier otro nodo, por ejemplo en el nodo 8. El coeficiente de transferencia C_{18} multiplicado por la magnitud de la onda transmitida en el nodo 1, es igual a la magnitud de la onda transmitida al nodo 8 via la trayectoria 1,8. En general, C_{18} no es igual a C_{81} . Definir de ésta manera a un coeficiente de transferencia resulta útil en la manipulación de problemas monofásicos. La impedancia de sobretensión R_1 , de la rama semi-infinita 1,0 incluye el efecto que tiene en el nodo 1 la red del nodo 8.

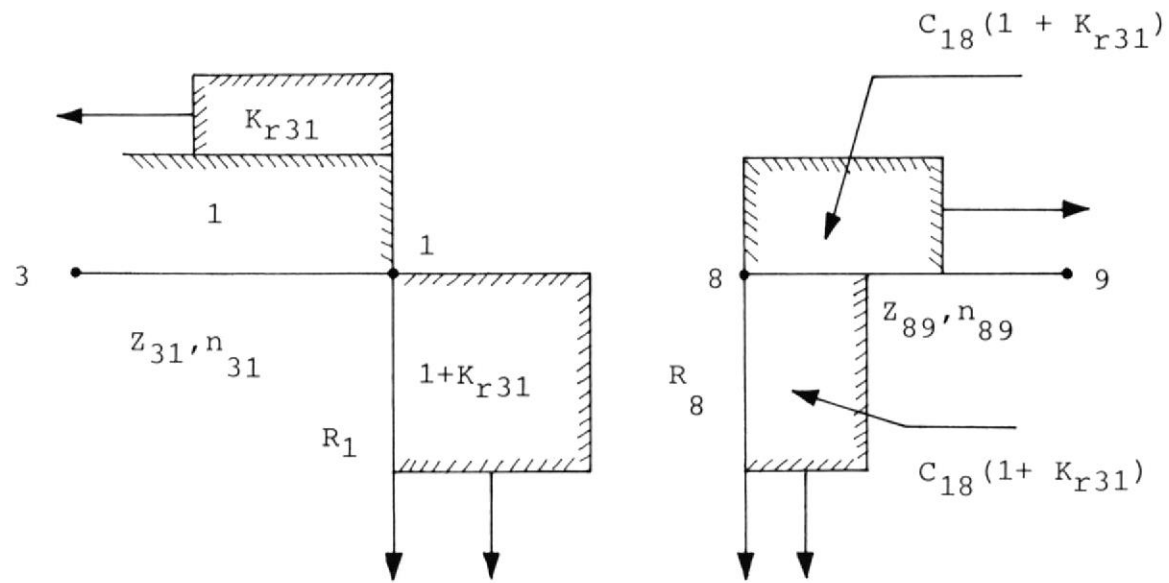


FIGURA 2.4.3.1. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA

2.4.4. Matriz Rama-Tiempo

La Matriz Rama-Tiempo es el "corazón" del Método de Ondas Viajeras, puesto que es por medio de ella que resulta posible el llevar un archivo, una historia, de las trayectorias e incrementos de cada onda, en particular, dentro del sistema. El funcionamiento de la Matriz Rama-Tiempo es principalmente un problema de organización, por lo que la mejor manera de explicarlo es por medio de un ejemplo.

Consideremos el sistema monofásico radial, que se indica en la figura 2.4.4.1, se ha escogido un sistema radial para simplificar la explicación, pero el método es igualmente aplicable a sistemas enmallados. La Matriz Rama-Tiempo correspondiente a dicho sistema se ilustra en la figura 2.4.4.2.

Las longitudes de las líneas que comprenden el sistema están dadas en términos del Intervalo Básico de Tiempo γ y la Matriz Rama-Tiempo corresponde al caso de una onda de voltaje del tipo escalón aplicada al sistema en la barra

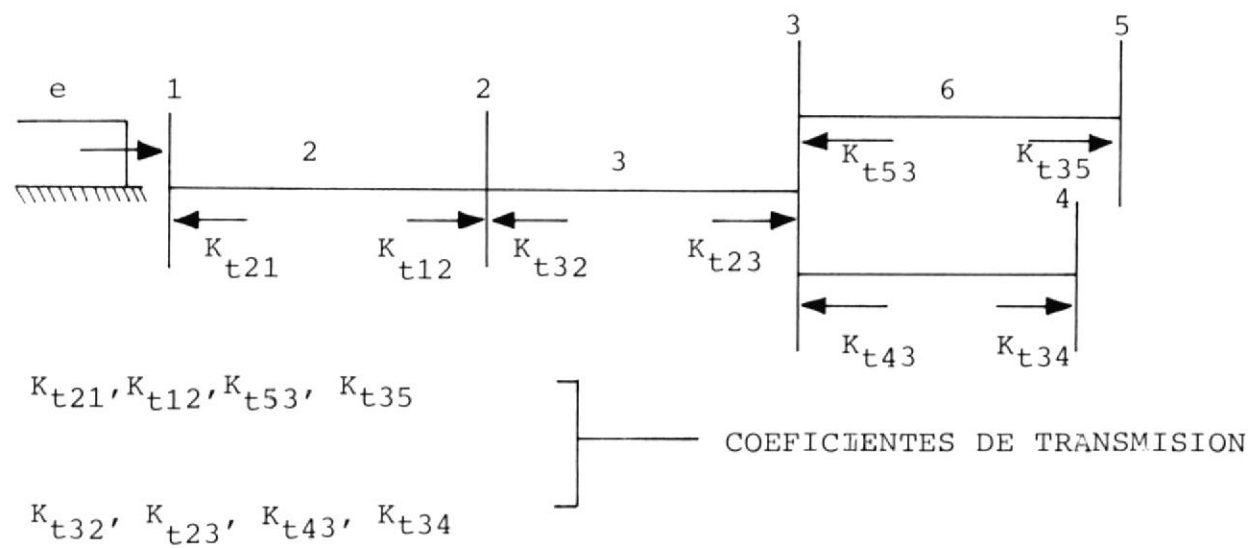
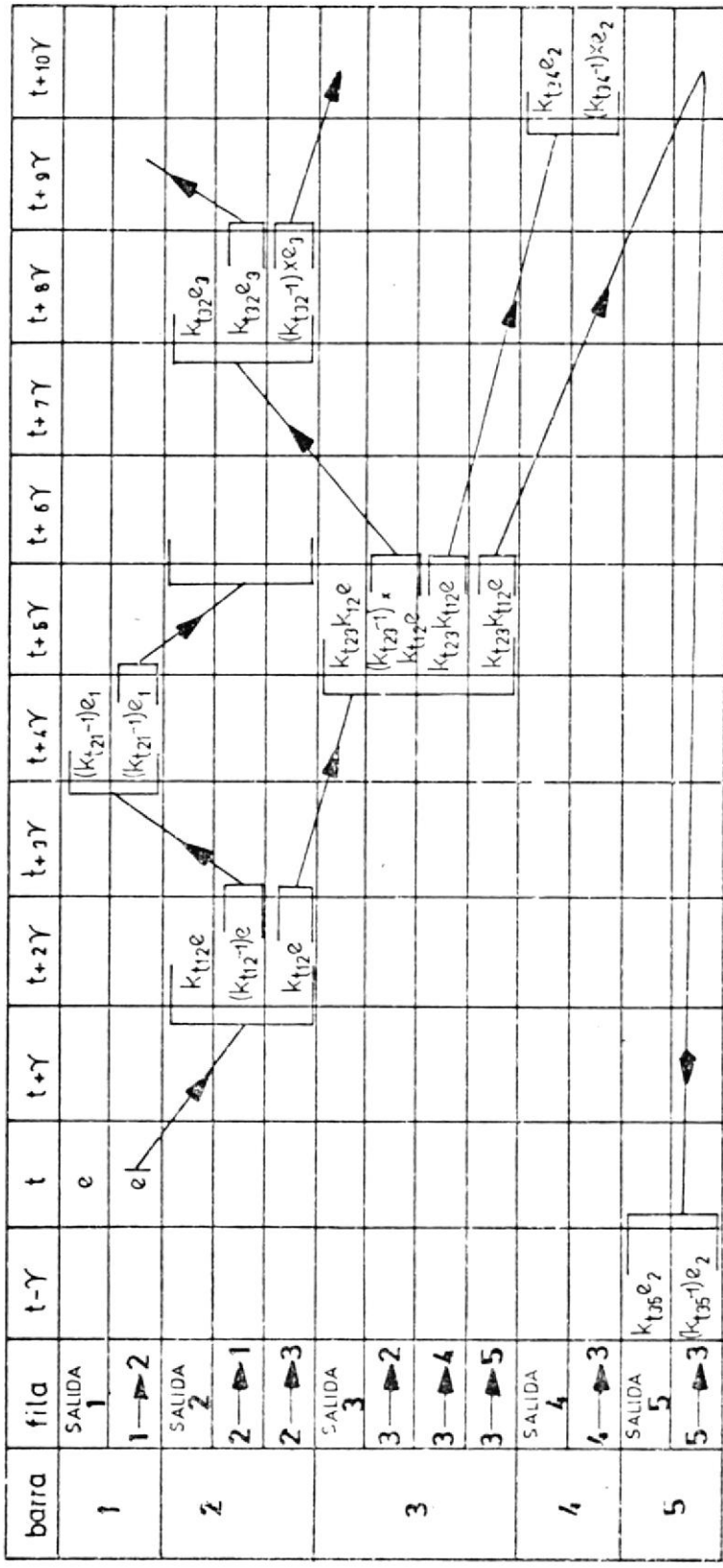


FIGURA 2.4.4.1. SISTEMA MONOFASICO RADIAL



$e_1 = (k_{t12-1})e$ $e_2 = k_{t23}k_{t12}e$ $e_3 = (k_{t23-1})k_{t12}e$

FIGURA 2.4.4.2. MATRIZ RAMA - TIEMPO

(o nodo)1, al tiempo $t = 0$.

A cada línea o rama del sistema le corresponden dos filas en la Matriz Rama-Tiempo, una para los incrementos de voltaje que viajan una dirección y otra para los incrementos de voltaje que viajan en dirección contraria a la anterior. Por ejemplo, la línea 1,2, en el sistema mostrado, tiene una fila $1 \rightarrow 2$ en la barra 1, para los incrementos que viajen desde 1 hasta 2 y una segunda fila $2 \rightarrow 1$ en la barra 2, para los incrementos que viajen desde 2 hacia 1.

Si se desea determinar el voltaje de una barra en particular, entonces es necesario contar con una fila para localizar dicho voltaje de salida, en ésta fila son sumados, en cada intervalo de tiempo, los incrementos de voltaje que llegan a la barra en cuestión.

En el ejemplo mostrado a cada barra se le ha asignado una fila para los voltajes de salida, pero en general, esto no siempre es necesario. La Matriz Rama-Tiempo se divide en intervalos de tiempo iguales al Intervalo Bá

sico de Tiempo γ . El escalón de voltaje e aplicado a la barra 1, al tiempo $t = 0$, es almacenado en la fila de salida para la barra 1 y en todas las otras filas asociadas con la barra 1. Dos intervalos de tiempo más tarde, éste escalón de voltaje llega a la barra 2 donde éste se multiplica por el coeficiente de transmisión K_{t12} correspondiente a las ondas que llegan a la barra 2 desde la barra 1. El voltaje $K_{t12}e$, se almacena en la fila de salida para la barra 2 y puesto que este voltaje se transmite a la barra 3, se debe almacenar también en la fila $2 \rightarrow 3$. Una onda reflejada viaja de regreso hacia la barra 1 desde la barra 2 y ésta tiene una magnitud de $(K_{t12}-1)e$, de acuerdo a la ecuación:

$$K_r = K_t - 1$$

Donde:

K_r = coeficiente de reflexión

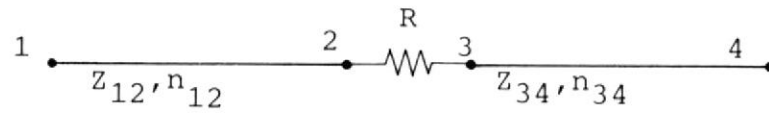
K_t = coeficiente de refracción.

La onda de voltaje K_{t12} e viaja hacia la barra 3, donde nuevamente es reflejada y refractada con coeficientes $(K_{t23} - 1)$ y K_{t23} , respectivamente. La Matriz Rama-Tiempo mostrada en la figura 2.4.4.2, no está completa, pero es suficiente para ilustrar su funcionamiento.

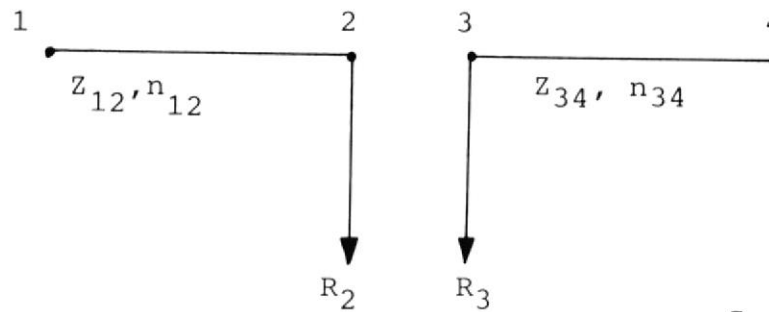
Cuando se usa una computadora digital, la Matriz Rama-Tiempo se almacena columna por columna y es procesada intervalo por intervalo, la salida requerida se obtiene a cada intervalo de tiempo. Se utiliza una técnica de rotación, según se ilustra en la figura 2.4.4.2, cuando el voltaje transmitido desde la barra 3 a la barra 5, llega a la barra 5, al tiempo $(t + 11\gamma)$. Puesto que la matriz mostrada termina al tiempo $(t + 10\gamma)$, el voltaje se almacena en la columna asignada anteriormente al tiempo $(t - \gamma)$ y que entonces le corresponde al tiempo $(t + 11\gamma)$.

2.5. EJEMPLOS ILUSTRATIVOS DE LA REDUCCION DE UNA RED Y SOLUCION

La figura 2.5.1,a muestra una resistencia concentra



(a)



(b)

$$R_2 = R + Z_{34}$$

$$C_{23} = Z_{34} / (R + Z_{34})$$

$$R_3 = R + Z_{12}$$

$$C_{32} = Z_{12} / (R + Z_{12})$$

FIGURA 2.5.1. RESISTOR EN SERIE, (a) RED FISICA, (b) RED REDUCIDA

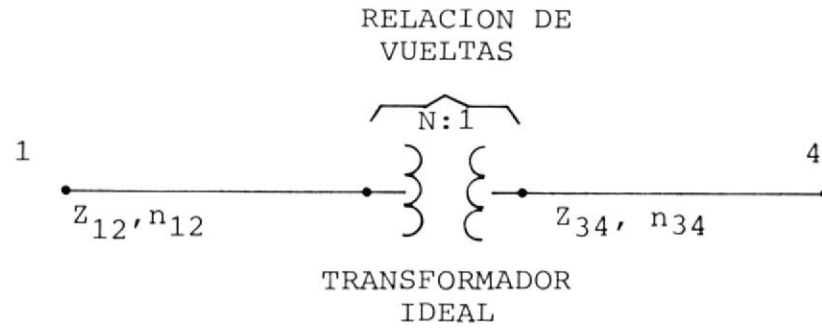
da conectada en serie entre las secciones de dos líneas de transmisión.

La reducción de ésta red a líneas finitas, semi-infinitas y coeficientes de transferencia se muestra en la figura 2.5.1,b.

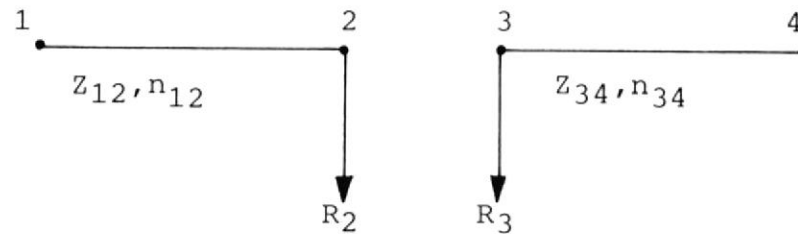
En la figura 2.5.1,a, en el instante en que una onda escalón unitario de voltaje, viajando en la rama 1,2 llega al nodo 2, ésta ve una impedancia de $R+Z_{34}$ inmediatamente hacia la derecha del nodo 2, ésta impedancia y Z_{12} determinan el valor de K_{r12} . Por lo tanto, en la figura 2.5.1,b R_2 es igual a $R + Z_{34}$.

El voltaje transmitido en el nodo 2, $1+K_{r12}$, se dividirá proporcionalmente entre R y Z_{34} , de manera que la onda transmitida, que viajará en la rama 3,4, tendrá una magnitud de $(1+K_{r12})Z_{34}/(R+Z_{34})$, por lo tanto, el valor de C_{23} será $Z_{34}/(R + Z_{34})$. Los valores de R_3 y C_{32} se derivan de una manera similar.

En la figura 2.5.2,a, se muestra un transformador ideal, con una relación de vueltas $N:1$, conectado en serie entre las secciones de dos líneas de transmisión. La red reducida se muestra en la figura 2.5.2,b. Los valores para R y C se derivan realizando un análisis similar al del ejemplo anterior.



(a)



(b)

$$R_2 = N^2 Z_{34}$$

$$R_3 = Z_{12} / N^2$$

$$C_{23} = 1/N$$

$$C_{32} = N$$

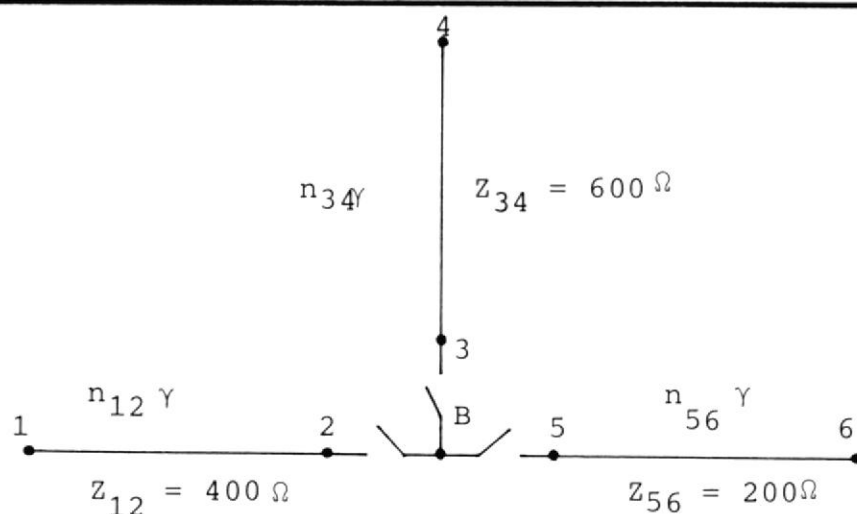
FIGURA 2.5.2. TRANSFORMADOR IDEAL EN SERIE, (a) RED FISICA; (b) RED REDUCIDA

La figura 2.5.3,a, muestra las secciones de tres líneas de transmisión, unidas en uno de sus extremos por medio de interruptores A, B y C. La red reducida, cuando los interruptores A, B y C están cerrados, se muestra en la figura 2.5.3.b. Por ejemplo, R_2 es simplemente la combinación en paralelo de Z_{34} y Z_{56} .

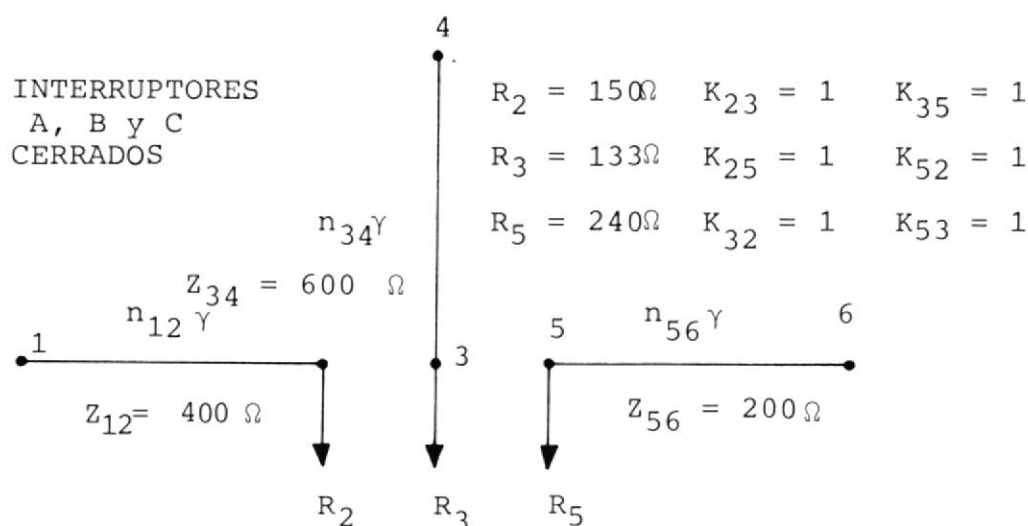
Todos los coeficientes de transferencia son iguales a la unidad, puesto que una onda escalón unitario de voltaje transmitida en el nodo 2, 3 o 5, pasará a las dos ramas restantes sin disminución o aumento en su magnitud. Se puede demostrar fácilmente que los voltajes de los nodos 2, 3 y 5, de la red reducida, son idénticos todo el tiempo.

La red reducida cuando los interruptores A y C están cerrados y el interruptor B está abierto, se muestra en la figura 2.5.3,c. Todos los coeficientes de transferencia hacia y desde el nodo 3 son iguales a cero. Este último ejemplo ilustra la manera como los cambios en la red pueden manejarse de una manera directa.

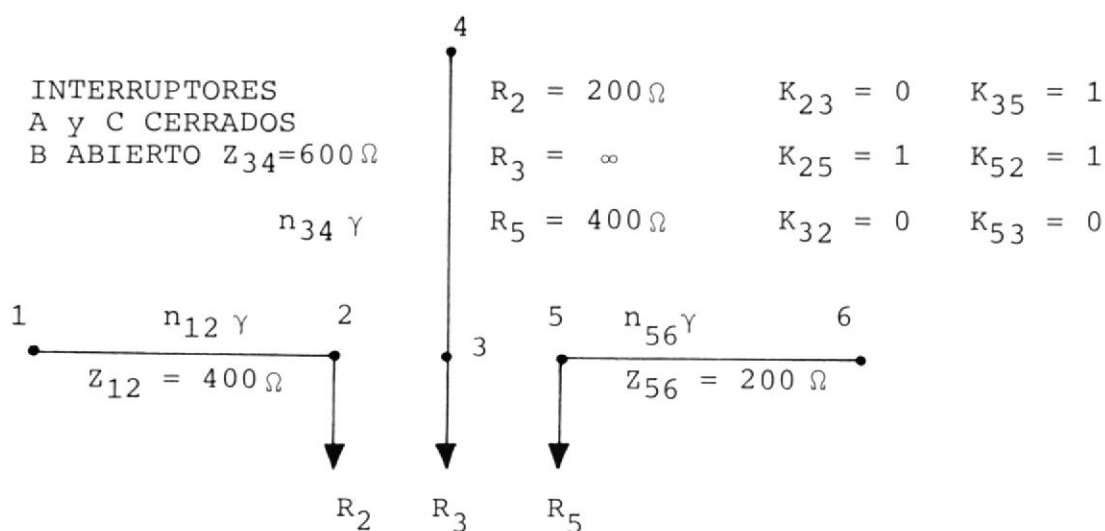
Es posible representar los elementos reactivos concentrados, capacitores e inductores, por medio del uso de líneas finitas de corta longitud, conocidas -



(a)



(b)



(c)

FIGURA 2.5.3. RED CON INTERRUPTORES MÚLTIPLES, a. RED FÍSICA, b. RED REDUCIDA. INTERRUPTORES CERRADOS, c. RED REDUCIDA. UN INTERRUPTOR ABIERTO.

como stubs. La respuesta transiente de un capacitor en una red se puede aproximar por una línea de parámetros distribuidos, en circuito abierto en su terminal remoto y con una capacitancia total igual a la capacitancia del capacitor que se quiere reemplazar. La exactitud de la aproximación depende de la longitud (y por lo tanto, del tiempo de tránsito) del stub usado.

La respuesta transiente de un inductor se puede aproximar por una línea de parámetros distribuidos, en cortocircuito en su terminal remoto y con una inductancia total igual a la inductancia del inductor que se quiere reemplazar; al igual que en el caso anterior, mientras más corto sea el stub, mejor será la aproximación.

Las hipótesis anteriores serán probadas para un caso en particular; el tiempo de tránsito y la impedancia característica de un stub están dadas por:

$$\gamma' = \sqrt{L'C'} \quad (2.5.1)$$

$$Z' = \sqrt{L'/C'} \quad (2.5.2)$$

Donde:

Donde:

γ' = tiempo de tránsito del stub

Z' = impedancia de sobretensión del stub

L' = inductancia total de stub

C' = capacitancia total de stub

L = inductancia del elemento concentrado que se quiere aproximar

C = capacitancia del elemento concentrado que se quiere aproximar.

Para un stub capacitivo ($C' = C$):

$$(\gamma')^2 = L'C$$

$$(Z')^2 = L'/C$$

$$Z' = \gamma'/C \tag{2.5.3}$$

Para un stub inductivo ($L' = L$):

$$(\gamma')^2 = LC'$$

$$(Z')^2 = L/C'$$

$$Z' = L/\gamma' \tag{2.5.4}$$

Una vez que γ' y L' o C' se han escogido, la longitud y la impedancia de sobretensión del stub quedan determinadas.

El stub equivalente puede ser descrito por medio de una línea finita, con notación de rama 1,2, tiempo de tránsito n_{12} γ e impedancia de sobretensión Z_{12} .

Luego para representar una capacitancia:

$$Z_{12} = n_{12} \gamma / C \quad (2.5.3.a)$$

Donde Z_{12} está en ohmios, γ en segundos y C en faradios.

Para representar una inductancia:

$$Z_{12} = L / n_{12} \gamma \quad (2.5.4.a)$$

donde L está en henrios.

Es preferible que la razón de la impedancia del stub, Z_{12} , a la impedancia de la red vista por el stub sea de 1 a 10 y de 10 a 1 para stubs capacitivos e inductivos, respectivamente.

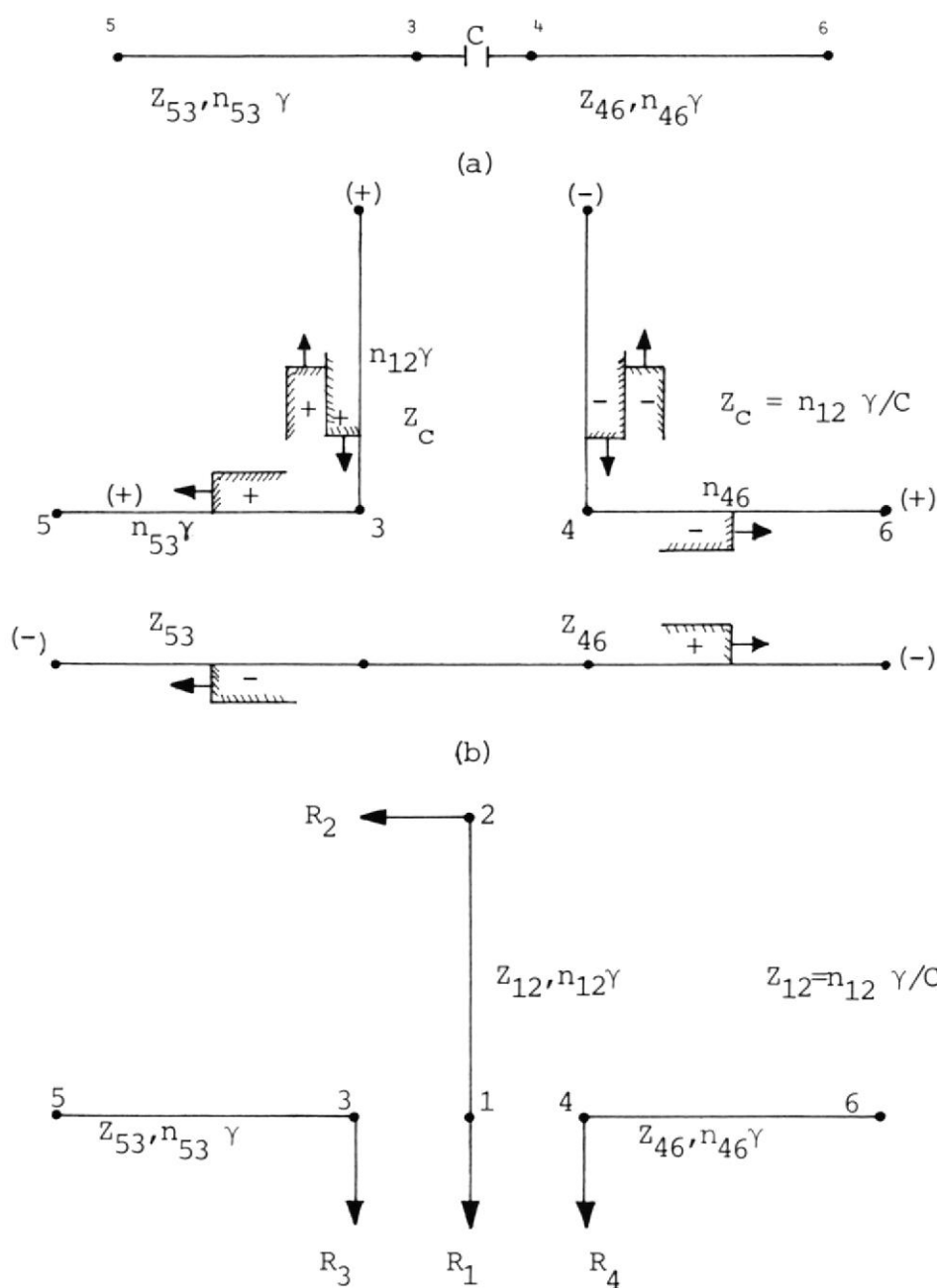
Sin embargo, razones tan bajas como de 1 a 3 (o de

3 a 1), han sido aplicadas con éxito. En cualquier caso, la máxima exactitud se obtiene cuando $n_{12} = 1$.

La figura 2.5.4.a muestra una capacitancia concentrada conectada en serie entre las secciones de dos líneas de transmisión.

En la figura 2.5.4.b, se ha conectado en serie, entre las dos líneas, un stub en circuito abierto y de impedancia de sobretensión Z_c . Tanto las líneas como el stub se representan por medio de redes de dos pares de terminales, indicándose la polaridad de los voltajes respectivos.

La red de la figura 2.5.4,b, puede ser reducida a la red de la figura 2.5.4,c, realizando un análisis similar al de los ejemplos anteriores. La rama 1,2, de la figura 2.5.4,c es en todos los aspectos idéntica al stub de la figura 2.5.4,b. Los signos negativos de los coeficientes de transferencia, C_{14} y C_{41} , resultan de la polaridad escogida para el voltaje, esto se ilustra en la figura 2.5.4,b, por la polaridad de las ondas generadas en el punto de transición, por una onda entrante en el stub capacitivo.



$$R_1 = Z_{53} + Z_{46}$$

$$R_2 = \infty$$

$$R_3 = Z_{12} + Z_{46}$$

$$R_4 = Z_{12} + Z_{53}$$

$$C_{31} = Z_{12} / (Z_{12} + Z_{46})$$

$$C_{34} = Z_{46} / (Z_{12} + Z_{46})$$

$$C_{13} = Z_{53} / (Z_{53} + Z_{46})$$

$$C_{14} = -Z_{46} / (Z_{46} + Z_{53})$$

$$C_{41} = -Z_{12} / (Z_{12} + Z_{53})$$

$$C_{43} = Z_{53} / (Z_{12} + Z_{53})$$

FIGURA 2.5.4. REPRESENTACION DE UNA CAPACITANCIA EN SERIE

La figura 2.5.5,a muestra una inductancia concentrada conectada en serie entre las secciones de dos líneas de transmisión.

El circuito reducido se muestra en la figura 2.5.5,b, donde el tiempo de tránsito y la impedancia de sobretensión de la rama 1,2, se escogen para simular la inductancia L. Una red alternativa es la de la figura 2.5.4,c con $R_2 = 0$, nuevamente los parámetros de la rama (stub) deben ser escogidos para simular la inductancia L.

Para simular un inductor en paralelo se cortocircuita el terminal remoto del stub inductivo a tierra y para representar un capacitor en paralelo se deja el terminal remoto del stub capacitivo en circuito abierto.

Se ha ilustrado la manera como los elementos de una red eléctrica lineal pueden ser descritos en términos de líneas finitas, líneas semi-infinitas y coeficientes de transferencia.

Ahora, es necesario establecer dentro de la computadora digital una red sintetica basada en las ramas, nodos, datos de entrada acerca de las trayectorias y seguir la generación y propagación de las ondas viajeras dentro de ésta red.

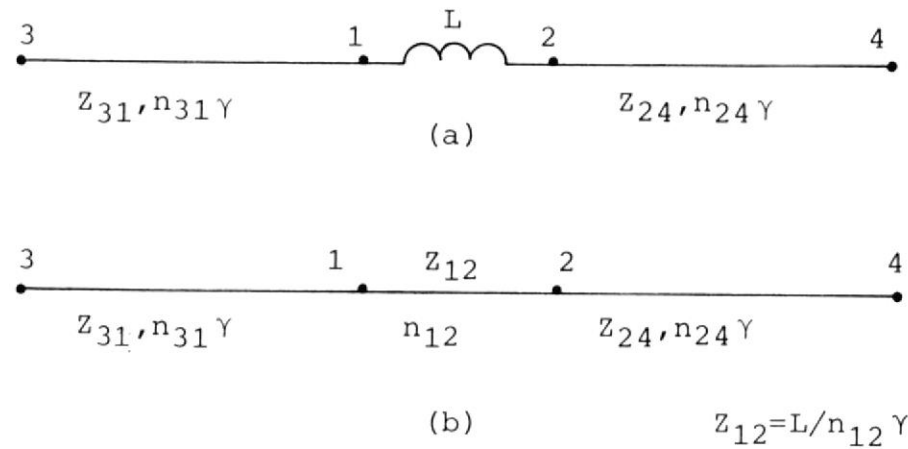


FIGURA 2.5.5. REPRESENTACION DE UNA INDUCTANCIA EN SERIE, (a) RED FÍSICA
(b) RED REDUCIDA.

La figura 2.5.6, muestra una red eléctrica simple, la cual ya ha sido reducida, las ramas, nodos y datos acerca de las trayectorias se han arreglado en forma tabular, listos para ser transferidos a la computadora. Dentro de la máquina, las ramas (las cuales son enlistadas automáticamente de dos maneras, por ejemplo, 1,2 y 2,1, etc.), se arreglan a b largo de un eje de la Matriz Rama-Tiempo, según se muestra en la figura 2.5.7, éstas se ordenan automáticamente en orden ascendente del primer numeral en la notación de rama.

Los elementos de tiempo, u_j (donde u es un entero positivo), se distribuyen a lo largo del segundo - eje de la matriz en orden ascendente de u . En el ejemplo mostrado, no es posible acomodar más de 26 valores consecutivos de u , esta restricción requiere que el factor, n_{ij} , para el tiempo de tránsito de las ramas se mantenga menor o igual a 25. Las trayectorias se arreglan en una matriz de una via (vector) y en orden ascendente del primer numeral en la notación para trayectorias.

Los coeficientes de reflexión (K_{rij}) y de refracción (K_{tij}) se calculan automáticamente en base a los da

LINEAS FINITAS			LINEAS SEMI-INF.		COEFICIENTES DE TRNASF.	
RAMA (ij)	R_{ij}	Z_{ij}	NODO (i)	R_i	TRAYECTORIA (ij)	K_{ij}
4,3	8	1	3	1	5,3	2
1,2	2	1	1	1	3,5	1/2
2,3	2	1	4	1		
5,6	2	1/4	6	1/4		
2,4	4	1	5	1/8		

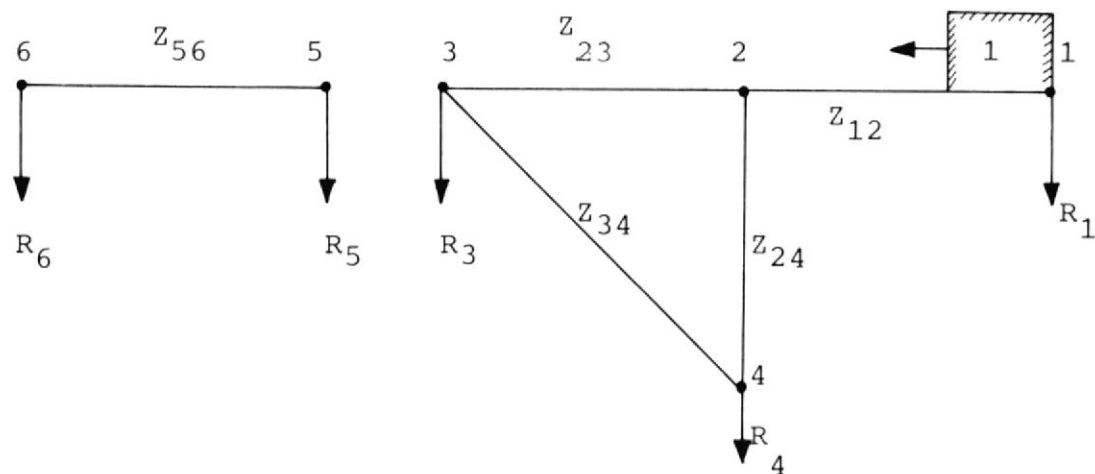


FIGURA 2.5.6. EJEMPLO DE UNA RED REDUCIDA

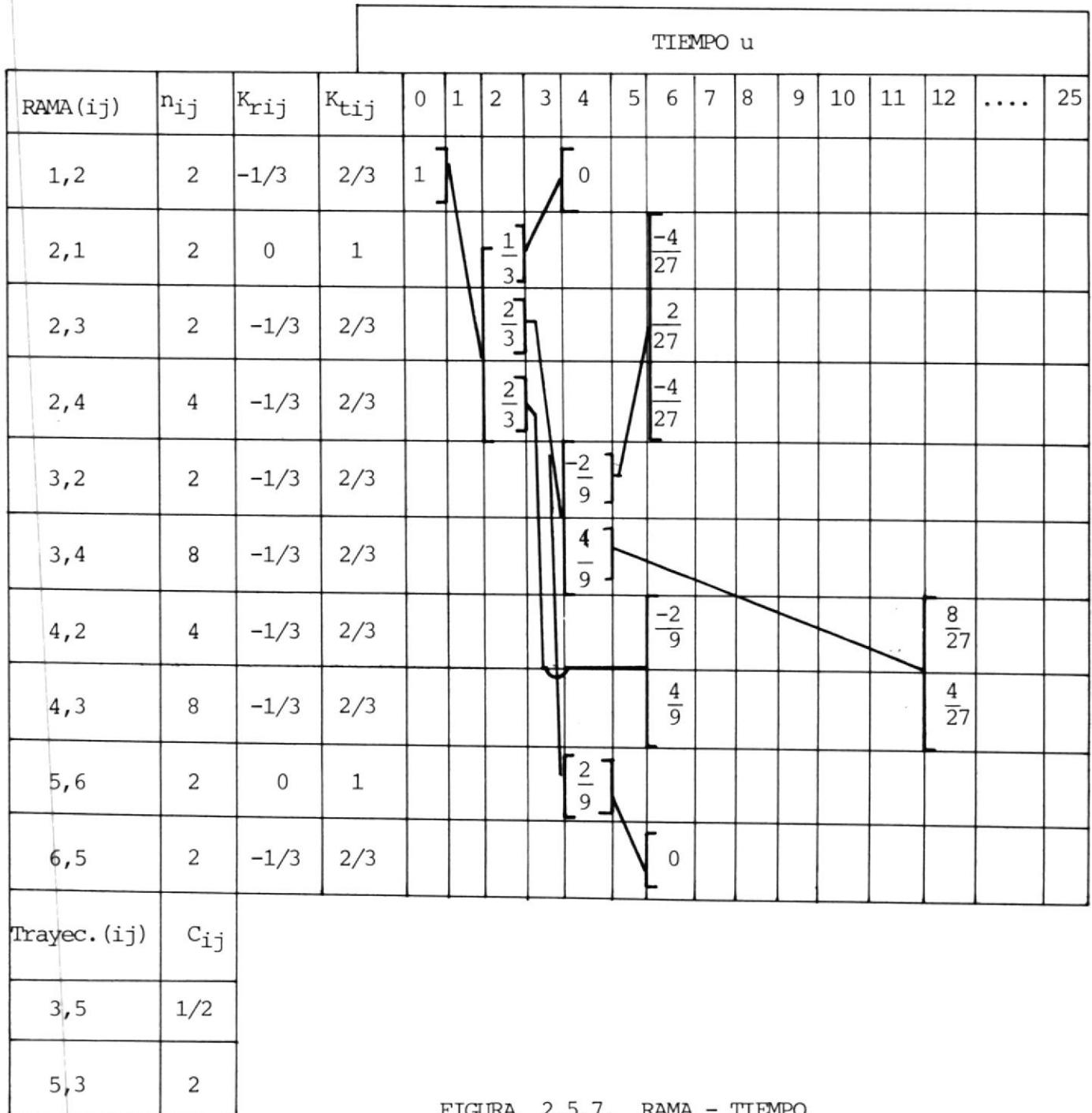


FIGURA 2.5.7. RAMA - TIEMPO

tos de entrada para Z_{ij} y R_i . Los valores de n_{ij} , K_{rij} , K_{tij} y C_{ij} se muestran en la figura 2.5.7, a lo largo de sus respectivas ramas y trayectorias.

Con el objeto de ilustrar el procedimiento empleado para seguir las ondas viajeras y para obtener tanto los voltajes de nodo como las corrientes de rama, supongamos (en la figura 2.5.6) que una onda escalón unitario de voltaje se genera en la rama 1.2, partiendo del nodo 1, al tiempo $u=0$.

En la figura 2.5.7, esta onda se almacena en las coordenadas rama 1,2; $u = 0$, de la Matriz Rama-Tiempo. Todos los demás voltajes de entrada, que puedan existir, son almacenados de una manera similar, al tiempo en que ellos son generador en la red.

Cuando la onda llega al nodo 2, al tiempo $u=n_{12}+0=2$, se generan dos ondas transmitidas, una en la rama 2,3 y otra en la rama 2,4; ambas de magnitud $K_{t12} = 2/3$. También se genera una onda reflejada, de magnitud $K_{r12} = -1/3$, en la rama 2.1.

Estas tres ondas, las cuales se propagan en ramas cuya notación comienza con el numeral 2, se muestran en sus respectivas coordenadas, en el vector $u = 2$, de la matriz Rama-Tiempo.

Una línea de flujo, desde la coordenada rama 1.2; $u=0$, indica su origen comun. La onda de magnitud $2/3$ que se ha almacenado en la coordenada rama 2.3; $u=2$ y que se propaga en la rama 2,3, llegará al nodo 3 al tiempo $u = n_{23} + 2 = 4$. La máquina por lo tanto debe buscar, en el eje de las ramas, aquellas notaciones de rama que comienzan con el numeral 3. Una onda transmitida de magnitud $(2/3)K_{t23} = 4/9$, se generará en la rama 3,4 y una onda reflejada de magnitud $(2/3)K_{r23} = -2/9$, se generará en la rama 3.2. No es necesario considerar la onda transmitida a R_3 puesto que nunca regresa.

Haciendo uso del vector de trayectorias, donde la búsqueda se limita nuevamente a notaciones de trayectorias que comienzan con el numeral 3, se observa que una onda que llega al nodo 3, generará ondas en el nodo 5. Por lo tanto, una onda transmitida, de magnitud $(2/3)C_{35}K_{t23} = 2/9$, será generada en la rama 5,6. Las tres ondas generadas se almacenan en las coordenadas correspondientes al vector $u = 4$ de la Matriz Rama-Tiempo.

Las ondas restantes, que se muestran en la matriz, pue

den ser determinadas de una manera similar.

En una red típica, es probable que una coordenada Rama-Tiempo reciba múltiples entradas, éstas en tradas sencillamente se suman y el total se usa para generar ondas adicionales.

Para obtener los voltajes de nodo, las ondas trans mitidas para un nodo en particular (aquellas que han sido calculadas usando el coeficiente de trans misión K_{tij}) se almacenan en un vector especial de tiempo, al tiempo correspondiente a su entrada en la MATRIZ Rama-Tiempo. Para un tiempo específico la suma de las entradas en el vector especial de tiempo, constituye el voltaje de nodo para ese tiempo.

Para obtener la corriente que sale del nodo i , en la rama i, j , todas las ondas, ya sea que estén saliendo o entrando al nodo i se dividen para Z_{ij} ; a las cantidades así calculadas se les cambia el signo cuando las ondas entran al nodo i .

CAPITULO III

DESARROLLO DE PROGRAMAS DE COMPUTACION PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO EL METODO DE ONDAS VIAJERAS.

3.1. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROGRAMA DESARROLLADO

El programa de computación para el cálculo de sobretensiones transitorias que se describe a continuación, fue desarrollado en base al Método de Ondas - Viajeras de acuerdo a las bases teóricas establecidas en el Capítulo II. Está escrito en lenguaje - FORTRAN IV y fue procesado en el Computador IBM Sistema 34 del Centro de Computación de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Las características generales que presenta el programa son:

- Las líneas de transmisión, monofásicas, se consideran ideales. Las líneas con pérdidas se pueden tratar en forma aproximada.

- No se consideran los efectos de distorsión y parámetros dependientes de la frecuencia.
- Los sistemas a estudiarse pueden contener parámetros concentrados R, L y C.
- Se pueden simular diversos tipos de perturbación en el sistema eléctrico de potencia, como energización de sistemas en vacío o caída de un rayo sobre una línea de transmisión.
- El programa desarrollado permite determinar las tensiones en los nodos y las corrientes a través de los elementos como funciones discretas del tiempo, durante el período en estudio.
- Es posible obtener el gráfico de voltaje (o corriente) Vs. tiempo de algunas de las variables de interés.

3.2. DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa de computación, aplicable a redes monofásicas, permite resolver problemas de sobretensiones transitorias en un sistema eléctrico de potencia cuya red reducida puede contener hasta: 50 nodos.

dos, 50 líneas finitas, 20 líneas semi-infinitas y 20 coeficientes de transferencia.

Los arreglos de las variables que son funciones del tiempo, fueron dimensionados para permitir que el tiempo de tránsito sea de 30 Intervalos Básicos de Tiempo (γ) como máximo; sin embargo, esto puede ser modificado cambiando las declaraciones COMMON involucradas. El programa está formado por 467 declaraciones FORTRAN, de las cuales 171 corresponden al programa fuente o programa principal y el resto se distribuye entre 4 subprogramas que realizan funciones específicas. Ocupa 45 Kbytes de memoria central y dos archivos de disco.

3.2.1. Programa Fuente

El programa principal está estructurado de manera que, luego de las instrucciones de especificación y de limpiar algunos de los arreglos usados, se realiza la lectura de todos los datos necesarios para el procesamiento de un estudio, no es posible realizar más de un estudio durante el mismo proceso. La lectu-

ra de los datos de entrada se realiza por medio del subprograma denominado SUBROUTINE LEC.

Posteriormente se realiza el cálculo de los coeficientes de reflexión y de refracción, almacenándolos en la Matriz Rama-Tiempo. La impresión de títulos y datos de entrada se realiza por medio del subprograma denominado SUBROUTINE IMPRES, luego de lo cual se hace igual a cero la variable tiempo y se generan las señales de perturbación por medio de la SUBROUTINE PERT. Una vez que las señales de perturbación han sido generadas se busca en la Matriz Rama-Tiempo los voltajes diferentes de cero y se identifican las ondas que se originan por reflexión y refracción, cuando una coordenada rama-tiempo recibe múltiples entradas, éstas se suman y el total se usa para generar ondas adicionales. Para obtener los voltajes de nodo, todas las ondas transmitidas para un nodo específico (aquellas que se han calculado usando el coeficiente de refracción KT) se almacenan en un vector especial de tiempo en el arreglo Nodo-Tiempo (que almacena todos los voltajes de nodo), al tiempo correspondiente a su entrada en la Matriz Rama-Tiempo,

cada onda transmitida se considera solamente una vez para obtener los voltajes de nodo, pero ésta puede almacenarse en varias coordenadas rama-tiempo. Posteriormente se busca en el arreglo que almacena todos los coeficientes de transferencia, de existir ondas generadas por este medio se realizan los cambios correspondientes en los voltajes de rama y de nodo. Las corrientes se obtienen por medio de los voltajes anteriormente calculados. Una vez que se han calculado todos los voltajes y las corrientes requeridas, se imprimen las variables de salida y el tiempo se incrementa en un Intervalo Básico de Tiempo (γ), se generan las señales de perturbación correspondientes al nuevo tiempo y el proceso se repite hasta alcanzar el tiempo final de cálculo especificado en los datos de entrada, luego de lo cual se grafican aquellos voltajes y corrientes que se han escogido en los datos de entrada por medio de la SUBROUTINE GRAF, con lo cual termina la ejecución del programa. El programa es capaz de una salida prácticamente sin límite en tiempo, puesto que cuando en la Matriz Rama-Tiempo y en el arreglo Nodo-Tiempo, se usa el vector correspondiente a $t = 0$, éste

no se requiere para los cálculos a realizarse en tiempos posteriores y se transforma en el vector correspondiente al tiempo $t = 32 \gamma$, luego en el correspondiente al tiempo $t = 64 \gamma$ y así sucesivamente, el mismo razonamiento se aplica a los 30 vectores restantes, esta es la razón por la cual el tiempo de tránsito máximo es de 30γ . Una técnica similar se usa en el programa descrito en el Capítulo V.

3.2.2. Subprogramas

Según se mencionó anteriormente, el programa hace uso de 4 subprogramas. A continuación se describe en forma muy breve la función que desempeña cada uno de estos subprogramas.

- a. SUBROUTINE LEC. Este subprograma realiza la lectura de los datos de entrada requeridos para el procesamiento de un estudio tales como: tiempos de cálculo, información de las líneas finitas, semi-infinitas y coeficientes de transferencia. La información sobre los voltajes aplicados al sistema y las opciones para los datos de salida se leen también por medio de esta subrutina.

- b. SUBROUTINE IMPRES. La impresión de títulos, datos de entrada y opciones para los datos de salida se realiza por medio de este subprograma, el cual permite identificar la posición y las unidades correspondientes a cada variable de salida, así como de las diferentes constantes requeridas para la generación de las señales de perturbación.
- c. SUBROUTINE PERT. Genera las señales de perturbación, este subprograma es similar a la SUBROUTINE ONDAS descrita en el Capítulo V, a excepción de que solamente genera señales de voltaje, de manera que las corrientes de entrada deben ser transformadas en señales de voltaje, multiplicándolas por la impedancia de rama adecuada, al igual que en la SUBROUTINE ONDAS se han incorporado cinco funciones: escalón, rampa, exponencial, seno y coseno trigonométrico, cada una de las cuales se identifica por una clave que se ingresa al programa entre los datos de entrada y es leída por la SUBROUTINE LEC. Mediante la función exponencial se pueden -

obtener una gran variedad de formas de onda, según se explica en Capítulo V, sección 5.2.2.e.

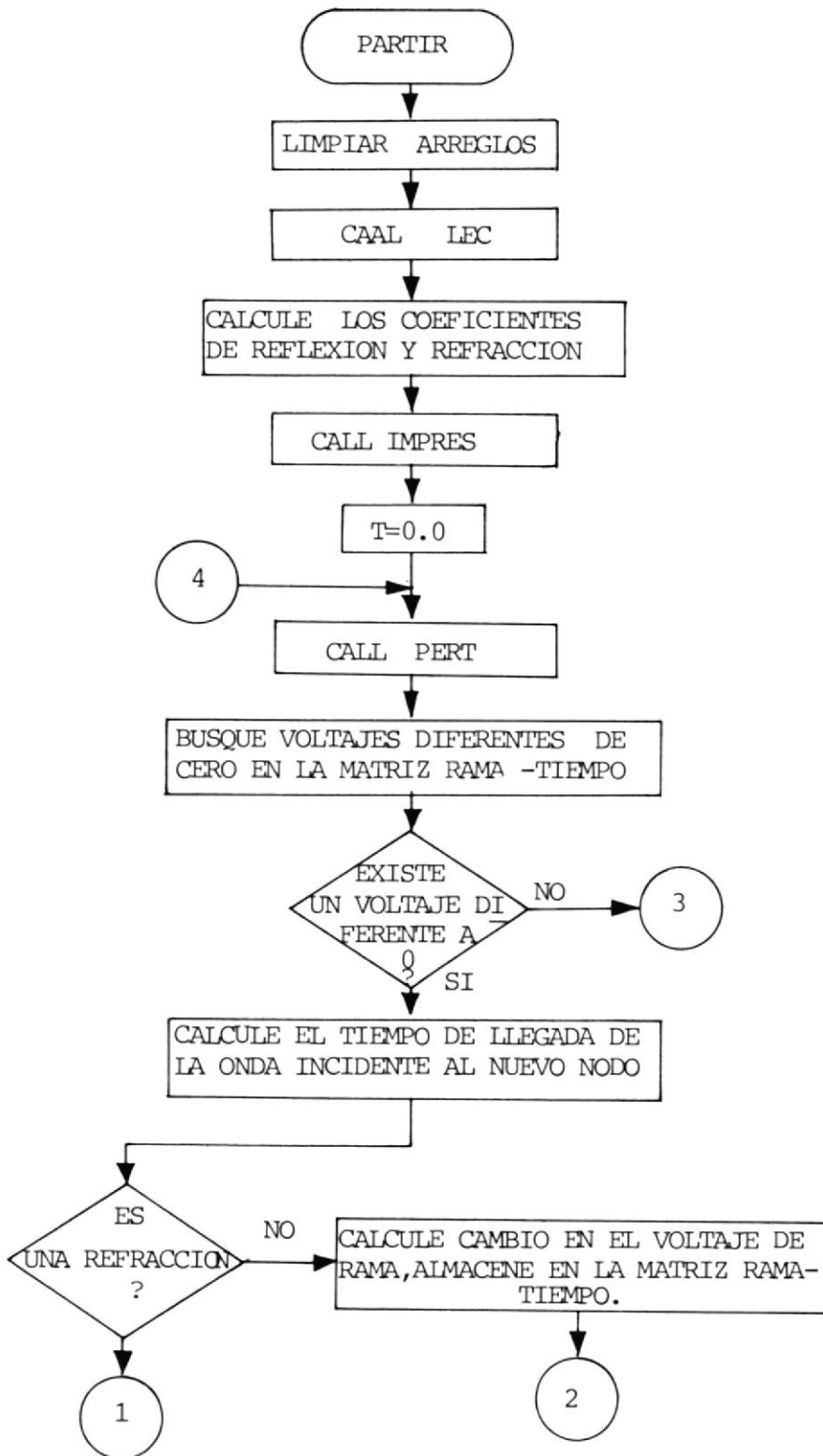
- d. SUBROUTINE GRAF. Esta subrutina es exactamente igual a la SUBROUTINE PLOT descrita en el Capítulo V, la única diferencia está en el área COMMON, razón por la cual se les ha asignado nombres diferentes.

3.2.3. Diagramas de Flujo

Se incluyen a continuación los diagramas de flujo del programa principal y de las subrutinas utilizadas, a excepción de la SUBROUTINE GRAF cuyo diagrama de flujo es exactamente igual al diagrama de flujo de la SUBROUTINE PLOT que se ilustra en la sección 5.2.3.

Por razones prácticas y tratando de dejar clara la secuencia de cálculo en cada caso, se han confeccionado diagramas muy simplificados los que, además de las bases teóricas descritas en el Capítulo II, pueden servir como guía para reproducir o mejorar los programas ya descritos.

DIAGRAMA DE FLUJO PROGRAMA FUENTE



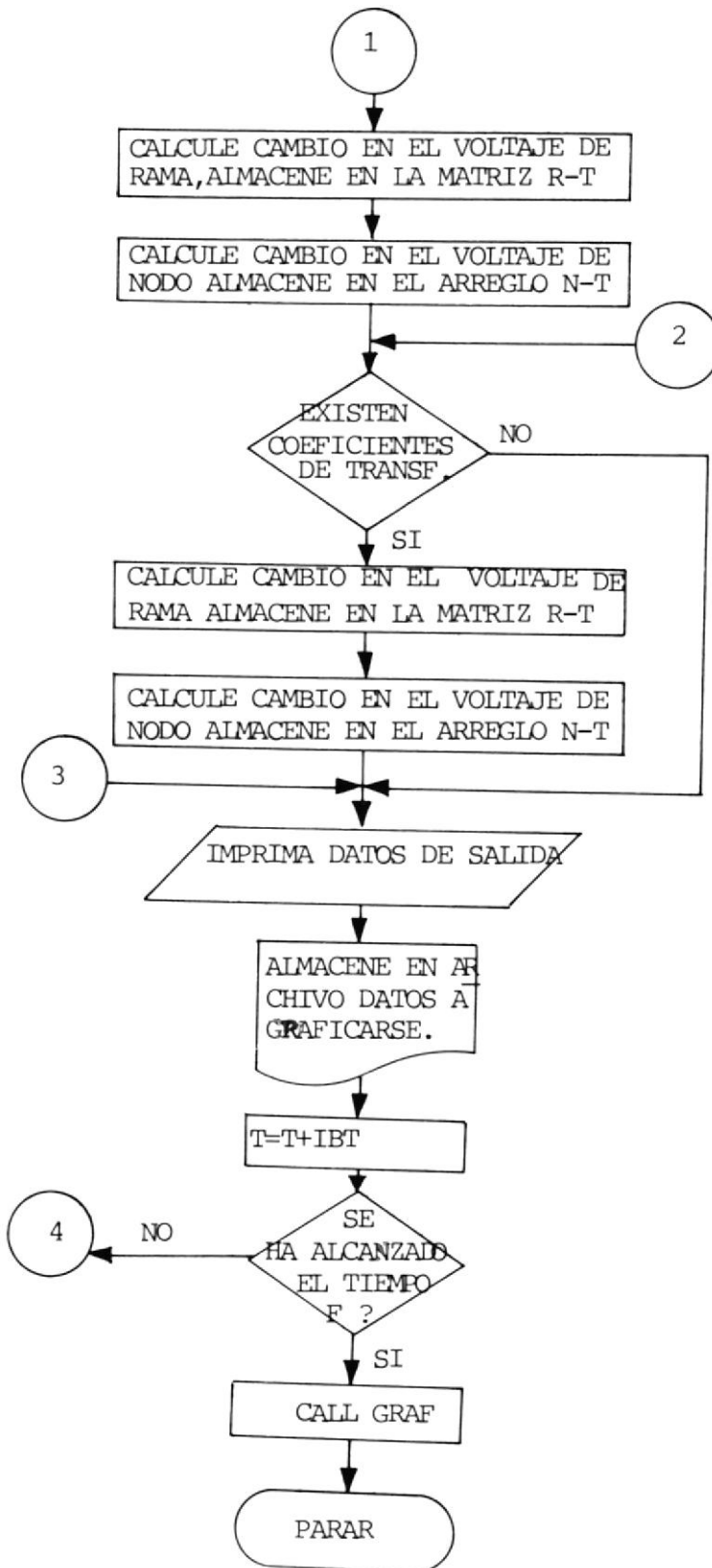
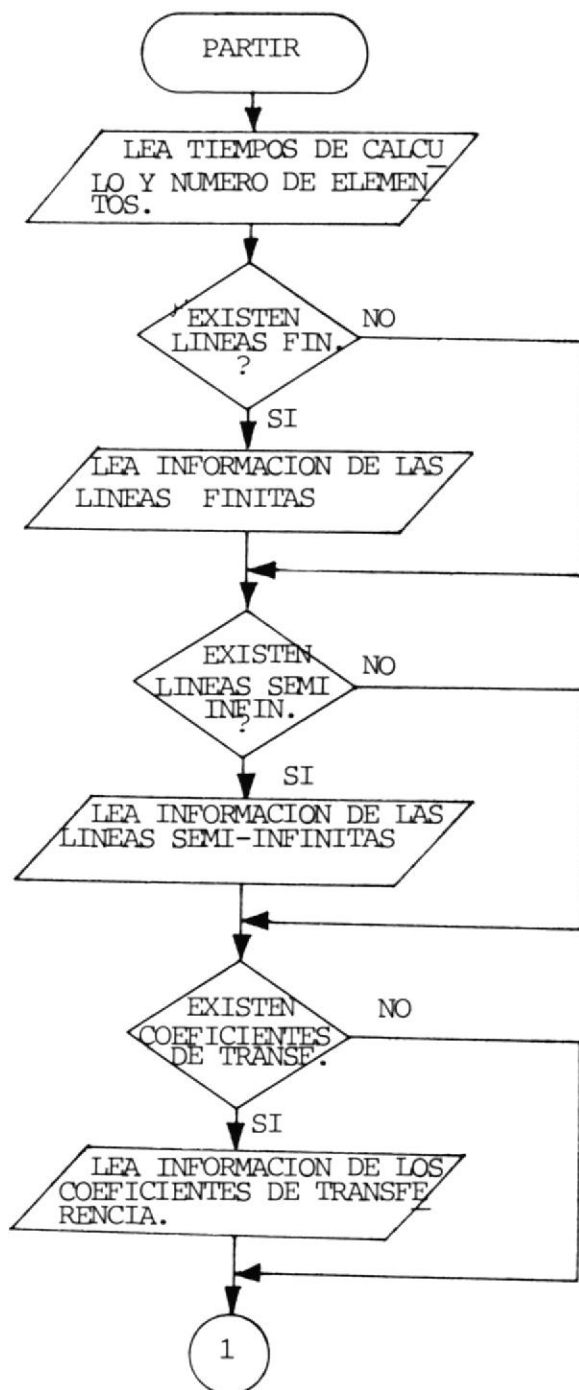


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE LEC



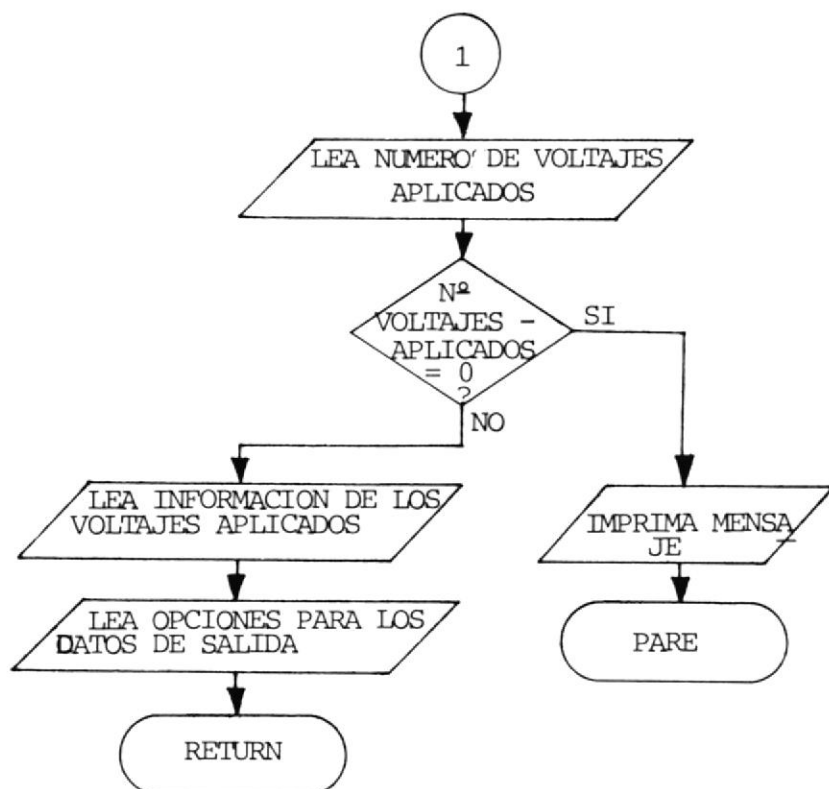
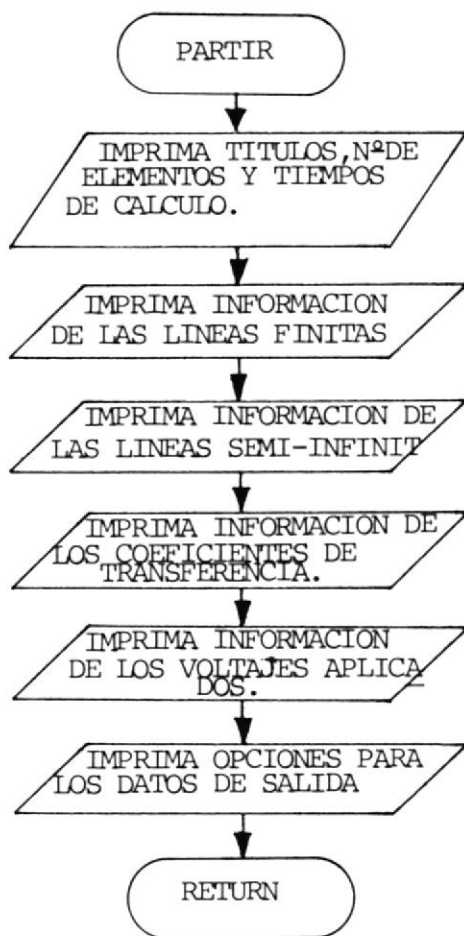
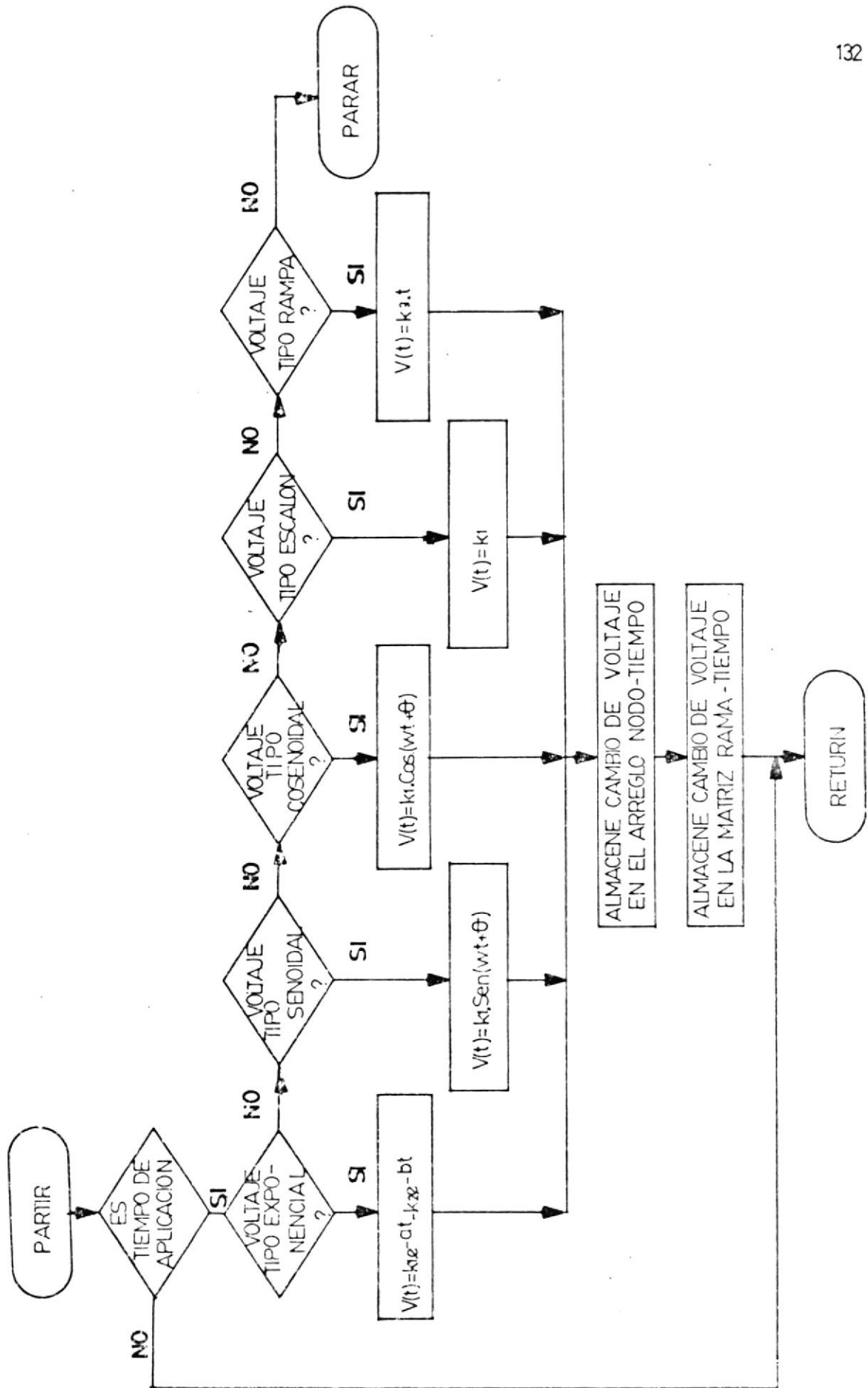


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE IMPRESS





3.2.4. Listado de Programas

A continuación se dan los listados generales de los programas desarrollados - con el objeto de completar la información que acerca de ellos se ha resumido en los diagramas de flujo anteriormente expuestos.

```

C *****134*****
C *
C * PROGRAMA PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EMPLEANDO EL METODO
C * DE ONDAS VIAJERAS
C *
C *****

```

```

C PROGRAM SOU

```

```

C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)

```

```

C INTEGER*2 PERIOD

```

```

C REAL IBT,KR,KI

```

```

C COMMON NN,NLF,NLSI,NCT,IBT,FINALT,TGRAF,TIMP,TII,TFI,TIG,TFG

```

```

C COMMON NI(100),NF(100),PERIOD(100),Z(100),NSI(20),R(20),NICT(20)

```

```

C COMMON NFCT(20),CT(20),NVA,NA(5),CLASE(5),FK1(5),ALFA1(5),FK2(5)

```

```

C COMMON ALEA2(5),TIA(5),TFA(5),FREQ(5),PHASE(5),FK3(5),NVIMP,NVI(9)

```

```

C COMMON NCIMP,NICI(9),NFCI(9),NVGRAF,NVG(5),NCGRAF,NICG(5),NFCG(5)

```

```

C COMMON KR(100),KI(100),KG,IR,VOLTN(50,31),VOLTR(100,31),I,ITL,ITC

```

```

C COMMON ITO,Y(200),TIME(200)

```

```

C DIMENSION VCIMP(9),VCGRAF(10),X(10),JN(131),JB(9)

```

```

C DEFINE FILE 15(200,10,U,I1),16(200,1,U,I2)

```

```

C DATA MJN,MJB/'-',',',' '

```

```

C ***LIMPIAR ARREGLOS***

```

```

C KG=31

```

```

C FIND(15*1)

```

```

C FIND(16*1)

```

```

C DO 13 I=1,KG

```

```

C DO 14 J=1,50

```

```

14 VOLTN(J,I)=0.0

```

```

C DO 15 K=1,100

```

```

15 VOLTR(K,I)=0.0

```

```

13 CONTINUE

```

```

C DO 16 K=1,131

```

```

16 JN(K)=MJN

```

```

C DO 17 K=1,9

```

```

17 JB(K)=MJB

```

```

C ***LEA DATOS DE ENTRADA***

```

```

C CALL LEC

```

```

C ***CALCULE LOS COEFICIENTES DE REFLEXION Y REFRACCION***

```

```

C ZEQ=0.0

```

```

C NR=2*NLF

```

```

C DO 1 K=1,NR

```

```

C DO 2 J=1,NR

```

```

C IF(NI(J).EQ.NF(K).AND.NF(J).NE.NI(K)) ZEQ=ZEQ+1.0/Z(J)

```

```

2 CONTINUE

```

```

C IF(NLSI.EQ.0) GO TO 60

```

```

C DO 3 J=1,NLSI

```

```

C IF(NSI(J).EQ.NF(K)) ZEQ=ZEQ+1.0/R(J)

```

```

3 CONTINUE

```

```

60 IF(ZEQ.EQ.0.0) GO TO 1

```

```

C ZEQ=1.0/ZEQ

```

```

C KR(K)=(ZEQ-Z(K))/(ZEQ+Z(K))

```

```

C KI(K)=1.0+KR(K)

```

```

C ZL=0.0

```

```

1 CONTINUE

```

```

C ***IMPRIMA TITULOS Y DATOS DE ENTRADA***

```

```

C CALL IMPRES

```

```

C IF(NVIMP.EQ.0.AND.NCIMP.EQ.0) GO TO 23

```

```

C WRITE(3,10)

```

```

10 FORMAT(1H1,35('*')/' *CORRIENTES Y/O VOLTAJES DE SALIDA*/1H ,

```

```

135('*')//)

```

```

C K1=NVIMP+NCIMP

```

```

C K2=(K1+1)*13+1

```

```

C WRITE(3,11) (JN(K),K=1,K2)

```

```

11 FORMAT(1H ,131A1)

```

```

C WRITE(3,12) (JB(K),K=1,K1)

```

```

12 FORMAT(1H ,1) TIEMPO |*,A1,*COLUMNA 2 |*,A1,*COLUMNA 3 |*,A1,

```

```

1,*COLUMNA 4 |*,A1,*COLUMNA 5 |*,A1,*COLUMNA 6 |*,A1,*COLUMNA 7

```

```

2 |*,A1,*COLUMNA 8 |*,A1,*COLUMNA 9 |*,A1,*COLUMNA 10 |*)

```

```

C WRITE(3,11) (JN(K),K=1,K2)

```

```

C
C   ***GENERE ONDAS DE PERTURBACION***
C
23  T=0.0
    ITL=1
    ITC=0
    NF1=0
50  ITD=ITL-KG*(ITL/KG)
    IF (ITD.EQ.0) ITD=KG
    CALL PERT
C
C   ***BUSQUE VOLTAJES DIFERENTES DE CERO***
C
DO 4 K=1,NR
  IF (VOLTR(K,ITD).EQ.0.0) GO TO 4
  KP=ITC+PERIOD(K)
  ITD1=KP-KG*(KP/KG)+1
  IC=0
C
C   ***IDENTIFIQUE LA REFLEXION Y LA REFRACCION***
C
DO 5 J=1,NR
  IF (NI(J).NE.NF(K)) GO TO 5
  IF (NF(J).EQ.NI(K)) GO TO 7
C
C   ***CALCULE LA REFRACCION Y VOLTAJES DE NODO***
C
VOLTP(J,ITD1)=VOLTR(J,ITD1)+VOLTR(K,ITD)*KT(K)
IF (IC.NE.0) GO TO 5
DO 6 L=1,N4
  IF (L.NE.NF(K)) GO TO 6
  VOLTN(L,ITD1)=VOLTN(L,ITD1)+VOLTR(K,ITD)*KT(K)
  IC=IC+1
5  CONTINUE
  GO TO 5
C
C   ***CALCULE LA REFLEXION***
C
7  VOLTR(J,ITD1)=VOLTR(J,ITD1)+VOLTR(K,ITD)*KR(K)
5  CONTINUE
C
C   ***BUSQUE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA***
C
IF (NCT.EQ.0) GO TO 4
DO 8 M=1,NCT
  IF (NICI(M).NE.NF(K)) GO TO 8
DO 9 N=1,NR
  IF (NI(N).NE.NECT(M)) GO TO 9
  VOLTR(N,ITD1)=VOLTR(N,ITD1)+VOLTR(K,ITD)*KT(K)*CT(M)
  IF (IC.NE.0) GO TO 9
  NI=NECT(M)
  VOLTN(N1,ITD1)=VOLTN(N1,ITD1)+VOLTR(K,ITD)*KT(K)
  IC=IC+1
9  CONTINUE
8  CONTINUE
4  CONTINUE
C
C   ***IMPRESION DATOS DE SALIDA***
C
IF (ITL.GE.I.DR.IF1.LI.I) GO TO 26
IF (NVIMP.EQ.0) GO TO 19
DO 18 K=1,NVIMP
  M=VI(K)
18  VCIMP(K)=VOLTN(M,ITD)
19  IF (NCIMP.EQ.0) GO TO 24
DO 20 K=1,NCIMP
  M=NICI(K)
  N=NECI(K)
DO 21 K1=1,NR
  IF (NI(K1).EQ.M.AND.NF(K1).EQ.N) GO TO 22
21  CONTINUE
22  K2=NVIMP+K
  VCIMP(K2)=VOLTR(K1,ITD)/Z(K1)
20  CONTINUE

```

```

24 IF((NVIMP.EQ.0.AND.NCIMP.EQ.0) GO TO 26
   K2=NVIMP+NCIMP
   WRITE(3,25) T,(VCIIMP(K),K=1,K2)
25 FORMAT(' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,
1,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ')
   TII=TII+TIIMP
C
C   ***ALMACENAR DATOS A GRAFICARSE***
C
26 IF((TIG.GT.T.OR.TFG.LT.T) GO TO 33
   IF((NVGRAF.EQ.0) GO TO 26
   DO 27 K=1,NVGRAF
   M=NVG(K)
27 VCGRAF(K)=VOLTIN(M,ITD)
28 IF((NCGRAF.EQ.0) GO TO 32
   DO 29 K=1,NCGRAF
   M=NICG(K)
   N=NFCG(K)
   DO 30 K1=1,NR
   IF((NI(K1).EQ.M.AND.NF(K1).EQ.N) GO TO 31
30 CONTINUE
31 K2=NVGRAF+K
   VCGRAF(K2)=VOLIR(K1,ITD)/Z(K1)
29 CONTINUE
32 IF((NVGRAF.EQ.0.AND.NCGRAF.EQ.0) GO TO 33
   K2=NVGRAF+NCGRAF
   WRITE(15'I1) (VCGRAF(K),K=1,K2)
   WRITE(16'I2) T
   NF1=NF1+1
   TIG=TIG+TGRAF
C
C   ***INCREMENTE VARIABLES DE TIEMPO***
C
33 T=T+IBT
   IT=IIT+1
   ITC=ITC+1
   IF((I.GT.FINALI) GO TO 36
   DO 34 K=1,NR
34 VOLIR(K,ITD)=0.0
   DO 35 K=1,NN
35 VOLTIN(K,ITD)=0.0
   GO TO 50
C
C   ***GRAFIQUE VARIABLES DE SALIDA***
C
36 K2=(NVIMP+NCIMP+1)*13+1
   WRITE(3,11) (JN(K),K=1,K2)
   IF((NVGRAF.EQ.0.AND.NCGRAF.EQ.0) GO TO 45
   DO 37 K=1,NF1
37 READ(15'K) TIMC(K)
   IF((NVGRAF.EQ.0) GO TO 41
   DO 38 K=1,NVGRAF
   DO 39 K1=1,NF1
   READ(15'K1) (X(K2),K2=1,K)
39 Y(K1)=X(K)
   WRITE(3,40) NVG(K)
40 FORMAT(1H1,'GRAFICO VOLTAJE VS TIEMPO',5X,'NODO NO.',I3//1H',3X,
1'TIEMPO',109X,'VOLTAJES')
   ENDD(15'I1)
   CALL GRAF(NF1)
38 CONTINUE
41 IF((NCGRAF.EQ.0) GO TO 45
   DO 42 K=1,NCGRAF
   K1=NVGRAF+K
   DO 43 K2=1,NF1
   READ(15'K2) (X(K3),K3=1,K1)
43 Y(K2)=X(K1)
   WRITE(3,44) NICG(K),NFCG(K)
44 FORMAT(1H1,'GRAFICO CORRIENTE VS TIEMPO',5X,'NODO INC.',I3,5X,
1'NODO FINAL=',I3//1H',3X,'TIEMPO',103X,'CORRIENTES')
   ENDD(15'I1)
   CALL GRAF(NF1)
42 CONTINUE
45 STOP
   END

```



```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA LA LECTURA DE DATOS DE ENTRADA *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE LEC
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD
C REAL I, T, KP, KT
C COMMON NN, NLF, NLSI, NCT, IBT, FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG
C COMMON NI(100), NF(100), PERIOD(100), Z(100), NSI(20), R(20), NICT(20)
C COMMON NFCI(20), CT(20), NVA, NA(5), CLASE(5), FK1(5), ALFA1(5), FK2(5)
C COMMON ALFA2(5), TIA(5), TFA(5), FREQ(5), PHASE(5), FK3(5), NVIMP, NVI(9)
C COMMON NCIMP, NICI(9), NFCI(9), NVGRAF, NVG(5), NCGRAF, NICG(5), NFCG(5)
C COMMON KP(100), KT(100), EG, NR, VOLTN(50, 31), VOLTR(100, 31), T, ITL, ITC
C COMMON ITJ, Y(200), IIML(200)
C DATA EXPO, SEN, COSE, RAY, ESC/ 'EXPO', 'SEN', 'COSE', 'RAY', 'ESC' /
C
C ***LEA TIEMPOS DE CALCULO Y NUMERO DE ELEMENTOS***
C
C READ(4, 1) NN, NLF, NLSI, NCT
C 1 FORMAT(5I5)
C READ(4, 2) IBT, FINALT, TGRAF, TIMP
C 2 FORMAT(4E10, 3)
C READ(4, 2) TII, TFI, TIG, TFG
C
C ***LEA INFORMACION DE LAS LINEAS FINITAS***
C
C IF(NLF.EQ.0) GO TO 5
C DO 3 K=1, NLF
C READ(4, 4) NI(K), NF(K), PERIOD(K), Z(K)
C 4 FORMAT(3I5, E10, 3)
C KI=NLF+K
C NI(KI)=NI(K)
C NF(KI)=NF(K)
C PERIOD(KI)=PERIOD(K)
C 3 Z(KI)=Z(K)
C
C ***LEA INFORMACION DE LAS LINEAS SEMI-INFINITAS***
C
C 5 IF(NLSI.EQ.0) GO TO 8
C DO 6 K=1, NLSI
C 6 READ(4, 7) NSI(K), P(K)
C 7 FORMAT(15, E10, 3)
C
C ***LEA INFORMACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA***
C
C 8 IF(NCT.EQ.0) GO TO 11
C DO 9 K=1, NCT
C 9 READ(4, 10) NICT(K), NECT(K), CT(K)
C 10 FORMAT(2I5, E10, 3)
C
C ***LEA INFORMACION DE LOS VOLTAJES APLICADOS***
C
C 11 READ(4, 1) NVA
C IF(NVA.EQ.0) GO TO 13
C DO 12 K=1, NVA
C READ(4, 14) NA(K), CLASE(K)
C 14 FORMAT(15, 1X, A1)
C IF(CLASE(K).EQ.EXPO) GO TO 15
C IF(CLASE(K).EQ.SEN.OR.CLASE(K).EQ.COSE) GO TO 16
C IF(CLASE(K).EQ.ESC) GO TO 17
C IF(CLASE(K).EQ.RAM) GO TO 18
C WRITE(1, 23)
C 23 FORMAT(1H1, ' SE HA ESPECIFICADO MAL EL TIPO DE UNO DE LOS VOLTAJES
C 1 APLICADOS, LA EJECUCION HA SIDO CANCELADA')
C STOP
C 15 READ(4, 19) FK1(K), ALFA1(K), FK2(K), ALFA2(K), TIA(K), TFA(K)
C GO TO 12
C 16 READ(4, 17) FK1(K), FREQ(K), PHASE(K), TIA(K), TFA(K)
C GO TO 12
C 17 READ(4, 19) FK1(K), TIA(K), TFA(K)

```

```

GO TO 12
13 READ(4,10)FK3(K),TIA(K),TFA(K)
12 CONTINUE
GO TO 21
19 FORMAT(8E10.3)
13 WRITE(3,20)
20 FORMAT(1H1,' NO EXISTEN VOLTAJES APLICADOS AL SISTEMA. LA EJECUCION
   IN HA SIDO CANCELADA')
STOP
C
C   ***LEA OPCIONES PARA LOS DATOS DE SALIDA***
C
21 READ(4,1)NVIMP
   IF(NVIMP.EQ.0) GO TO 22
   READ(4,1) (NVI(K),K=1,NVIMP)
22 READ(4,1)NCIMP
   IF(NCIMP.EQ.0) GO TO 24
   DO 23 K=1,NCIMP
23 READ(4,1)NICI(K),NFCI(K)
24 READ(4,1)NVGRAF
   IF(NVGRAF.EQ.0) GO TO 25
   READ(4,1) (NVG(K),K=1,NVGRAF)
25 READ(4,1)NCGRAF
   IF(NCGRAF.EQ.0) GO TO 27
   DO 26 K=1,NCGRAF
26 READ(4,1)NICG(K),NFCG(K)
27 RETURN
   END

```

IMPRES T=50 DATE 83/01/10 TIME

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA LA IMPRESION DE TITULOS Y DATOS DEL SISTEMA *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE IMPRES
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD
C REAL IBT,KP,KT
C COMMON NI,NLE,NLSI,NCT,IBT,FINALT,TGRAF,TIMP,TII,TFI,TIG,TEG
C COMMON NI(100),NF(100),PERIOD(100),Z(100),NSI(20),R(20),NICT(20)
C COMMON NFCI(20),CI(20),NVA,NA(5),CLASE(5),FK1(5),ALFA1(5),FA2(5)
C COMMON ALFA2(5),TIA(5),TFA(5),FREQ(5),PHASE(5),FK3(5),NVIMP,NVI(9)
C COMMON NCIMP,NICI(9),NFCI(9),NVGRAF,NVG(5),NCGRAF,NICG(5),NFCG(5)
C COMMON KP(100),KT(100),KG,NR,VOLTN(50,31),VOLT(100,31),T,ITL,ITC
C COMMON IT0,Y(200),TIME(200)
C DATA EXP0,SEN,CUSE,RAM,ESC/'EXP0','SEN','CUSE','RAM','ESC'/
C
C ***IMPRESA TITULOS, NUMERO DE ELEMENTOS Y TIEMPOS DE CALCULO***
C
C WRITE(3,1)
C 1 FORMAT(1H1,31X,57(('*')/32X,'*',55X,'*')/32X,'* CALCULO DE SOBRETENS
   IONES EMPLEANDO EL METODO DE ONDAS VIAJERAS */32X,'*',55X,'*')/32X
C 2,57(('*')/2)
C WRITE(3,2)
C 2 FORMAT(1H1,' LAS UNIDADES SON: '//1H , 'VOLTAJES',5X,' = VOLTIOS//1H
   1, 'CORRIENTES = AMPERIOS//1H FRECUENCIAS = CICLOS/SEG//1H ANGULO
   25,5X,' = GRADOS//1H IMPEDANCIAS = OHMIOS//1H TIEMPO',5X,' = MINUTOS
   36,60X,'//1H)

```

```

WRITE(3,3) N, NLF, NLSI, NCT
3 FORMAT(1H ,10('**')/' *DATOS DE ENTRADA*/1H ,10('**')///' NUMERO DE
1 NODOS',20X,'= ',12/' NUMERO DE LINEAS FINITAS',17X,'= ',12/'
2 NUMERO DE LINEAS SEMI-INFINITAS',10X,'= ',12/' NUMERO DE COEFICI
3 ENTES DE TRANSFERENCIA = ',12//)
WRITE(3,4) IBT, TIMP, TGRAF, TII, TFI, TIG, TFG, FINALT
4 FORMAT(1H ,INTERVALO BASICO DE TIEMPO',6X,'= ',E10.3/' INTERVALO D
1 IMPRESION',10X,'= ',E10.3/' INTERVALO DE GRAFICACION',8X,'= ',
2 E10.3/' TIEMPO INICIAL DE IMPRESION',5X,'= ',E10.3/' TIEMPO FINAL
3 DE IMPRESION',7X,'= ',E10.3/' TIEMPO INICIAL DE GRAFICACION' =
4 ',E10.3/' TIEMPO FINAL DE GRAFICACION',5X,'= ',E10.3/' TIEMPO FI
5 NAL DE CALCULO',9X,'= ',E10.3//)
C
C ***IMPRESION INFORMACION DE LAS LINEAS FINITAS***
C
WRITE(3,5)
5 FORMAT(1H ,35('**')/' *INFORMACION DE LAS LINEAS FINITAS*/1H ,
135('**')//)
IF(NLF.EQ.0) GO TO 9
WRITE(3,6)
6 FORMAT(1H ,'NODO INICIAL _ NODO FINAL _ PERIODO _ IMPEDANCIA')
DO 7 K=1,NLF
IF(PERIOD(K).GT.30) GO TO 52
7 WRITE(3,8) NI(K),NF(K),PERIOD(K),Z(K)
8 FORMAT(1H ,5X,12,12X,12,9X,12,6X,E10.3)
GO TO 11
9 WRITE(3,10)
10 FORMAT(1H ,'NO EXISTEN LINEAS FINITAS EN EL SISTEMA')
C
C ***IMPRESION INFORMACION DE LAS LINEAS SEMI-INFINITAS***
C
11 WRITE(3,12)
12 FORMAT(//1H ,42('**')/' *INFORMACION DE LAS LINEAS SEMI-INFINITAS*/
1/1H ,42('**')//)
IF(NLSI.EQ.0) GO TO 16
WRITE(3,13)
13 FORMAT(1H ,'NODO',5X,'IMPEDANCIA')
DO 14 K=1,NLSI
14 WRITE(3,15) NSI(K),R(K)
15 FORMAT(1H ,13,6X,E10.3)
GO TO 18
16 WRITE(3,17)
17 FORMAT(1H ,'NO EXISTEN LINEAS SEMI-INFINITAS EN EL SISTEMA')
C
C ***IMPRESION INFORMACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA***
C
18 WRITE(3,19)
19 FORMAT(//1H ,50('**')/' *INFORMACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFE
1RENCIA*/1H ,50('**')//)
IF(LCT.EQ.0) GO TO 23
WRITE(3,20)
20 FORMAT(1H ,'NODO INICIAL _ NODO FINAL _ COEF. TRANS.')
```

```

29 FORMAT(1H , 'NO. ', 3X, 'NODO', 3X, 'TIPO', 7X, 'FK1', 11X, 'ALFA1', 9X, 'FK2',
1, 11X, 'ALFA2', 6X, 'TIEMPO INICIAL', 4X, 'TIEMPO FINAL' / 2X, 11, 5X, 12, 4X,
2A4, 4(4X, E10.3), 6X, E10.3, 7X, E10.3 //)
ALFA1(K)=ALFA1(K)*IST*1.0E-3
ALFA2(K)=ALFA2(K)*IST*1.0E-3
GO TO 27

30 WRITE(3,31)K,NA(K),CLASE(K),FK1(K),FREQ(K),PHASE(K),TIA(K),TFA(K)
31 FORMAT(1H , 'NO. ', 3X, 'NODO', 3X, 'TIPO', 7X, 'FK1', 9X, 'FREQ', 6X, 'PHASE',
1, 4X, 'TIEMPO INICIAL', 4X, 'TIEMPO FINAL' / 2X, 11, 5X, 12, 4X, A4, 4X, E10.3,
24X, F6, 2, 4X, F6, 2, 6X, E10.3, 7X, E10.3 //)
PIE=3.1415926536
FREQ(K)=2.0*PIE*FREQ(K)*IST*1.0E-3
PHASE(K)=PHASE(K)*PIE/180.0
GO TO 27

32 WRITE(3,33)K,NA(K),CLASE(K),FK1(K),TIA(K),TFA(K)
33 FORMAT(1H , 'NO. ', 3X, 'NODO', 3X, 'TIPO', 7X, 'FK1', 8X, 'TIEMPO INICIAL',
14X, 'TIEMPO FINAL' / 2X, 11, 5X, 12, 4X, A4, 4X, E10.3, 5X, E10.3, 7X, E10.3 //)
GO TO 27

34 WRITE(3,35)K,NA(K),CLASE(K),FK3(K),TIA(K),TFA(K)
35 FORMAT(1H , 'NO. ', 3X, 'NODO', 3X, 'TIPO', 7X, 'FK3', 8X, 'TIEMPO INICIAL',
14X, 'TIEMPO FINAL' / 2X, 11, 5X, 12, 4X, A4, 4X, E10.3, 6X, E10.3, 7X, E10.3 //)
27 CONTINUE

C
C ***IMPRIMA OPCIONES PARA LOS DATOS DE SALIDA***
C
WRITE(3,36)
36 FORMAT(1H , 35('*')// '#OPCIONES PARA LOS DATOS DE SALIDA*' / 1H ,
135('*')//)
IF(NVIMP.EQ.0) GO TO 40
WRITE(3,37)NVIMP
37 FORMAT(1H , 'NUMERO DE VOLTAJES A IMPRIMIRSE = ', 11//7X, 'COLUMNA
1NO. ', 4X, 'NODO'//)
DO 38 K=1, NVIMP
K1=K+1
38 WRITE(3,39)K1, NVI(K)
39 FORMAT(12X, 11, 10X, I2)
40 IF(NVGRAF.EQ.0) GO TO 44
WRITE(3,41)NVGRAF
41 FORMAT(// ' NUMERO DE VOLTAJES A GRAFICARSE = ', 11//15X, 'NODO'//)
DO 42 K=1, NVGRAF
42 WRITE(3,43)NVG(K)
43 FORMAT(15X, I2)
44 IF(NCIMP.L.0) GO TO 48
WRITE(3,45)NCIMP
45 FORMAT(// ' NUMERO DE CORRIENTES A IMPRIMIRSE', 5X, '= ', 11// ' COLUMN
1A NO. NODO INC. NODO FINAL'//)
DO 46 K=1, NCIMP
K1=NVIMP+K+1
46 WRITE(3,47)K1, NICI(K), NFCI(K)
47 FORMAT(6X, 11, 11X, I2, 11X, I2)
48 IF(NCGRAF.EQ.0) GO TO 54
WRITE(3,49)NCGRAF
49 FORMAT(' NUMERO DE CORRIENTES A GRAFICARSE', 5X, '= ', 11//6X, 'NODO I
1NC. ', 4X, 'NODO FINAL'//)
DO 50 K=1, NCGRAF
50 WRITE(3,51)NICG(K), NFCG(K)
51 FORMAT(9X, I2, 12X, I2)
GO TO 54
52 WRITE(3,53)KG
53 FORMAT(///// ' EXISTE UN PERIODO MAYOR QUE', I3, ', LA EJECUCION HA SI
1DU CANCELADA'//)
54 RETURN
END

```

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA LA GENERACION DE ONDAS *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE PERT
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 P, ITD
C REAL IBT, KP, KT
C COMMON NN, NLF, NLSI, NCT, IBT, FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG
C COMMON NI(100), NF(100), PERIOD(100), Z(100), NSI(20), R(20), NICT(20)
C COMMON NECT(20), CT(20), NVA, NA(5), CLASE(5), FK1(5), ALFA1(5), FK2(5)
C COMMON ALFA2(5), TIA(5), TFA(5), FREQ(5), PHASE(5), FK3(5), NVIMP, NVI(9)
C COMMON NCIMP, NICI(9), NCCI(9), NVGRAF, NVG(5), NCGRAF, NICG(5), NCCG(5)
C COMMON KR(100), KT(100), KG, NR, VOLTN(50, 31), VOLTR(100, 31), T, IIL, ITC
C COMMON ITD, Y(200), TIME(200)
C DATA EXPD, SEN, COSE, RAM, ESC/'EXPD', 'SEN', 'COSE', 'RAM', 'ESC'/
C DO 1 K=1, NVA
C   TID=TIA(K)/IBT
C   IT1=TIA(K)/IBT
C   DEC=TID-IT1
C   IF(DEC.GT.0.5) IT1=IT1+1
C   TFD=TFA(K)/IBT
C   IT2=TFA(K)/IBT
C   DEC=TFD-IT2
C   IF(DEC.GT.0.5) IT2=IT2+1
C   IF(IT1.GT.ITC.OR.IT2.LT.ITC) GO TO 1
C   M=NA(K)
C   IF(CLASE(K).EQ.EXPD) GO TO 2
C   IF(CLASE(K).EQ.SEN) GO TO 3
C   IF(CLASE(K).EQ.COSE) GO TO 4
C   IF(CLASE(K).EQ.ESC) GO TO 5
C   IF(CLASE(K).EQ.RAM) GO TO 6
C   STOP
C 2 A1=-ALFA1(K)*ITC
C   A2=-ALFA2(K)*ITC
C   VOLTN(M, ITD)=FK1(K)*EXP(A1)-FK2(K)*EXP(A2)
C   GO TO 7
C 3 A1=FREQ(K)*ITC
C   A2=PHASE(K)
C   VOLTN(M, ITD)=FK1(K)*SIN(A1+A2)
C   GO TO 7
C 4 A1=FREQ(K)*ITC
C   A2=PHASE(K)
C   VOLTN(M, ITD)=FK1(K)*COS(A1+A2)
C   GO TO 7
C 5 VOLTN(M, ITD)=FK1(K)
C   GO TO 7
C 6 VOLTN(M, ITD)=FK3(K)*ITC
C 7 DO 8 J=1, NR
C   IF(NI(J).EQ.M) VOLTR(J, ITD)=VOLTR(J, ITD)+VOLTN(M, ITD)
C 8 CONTINUE
C 1 CONTINUE
C   RETURN
C   END

```

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA GRAFICAR LOS VOLTAJES Y CORRIENTES DE SALIDA *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE GRAF (NF1)
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD
C REAL IBT,KP,KT
C COMMON NN,NLF,NLSI,NCT,IBT,FINALT,TGRAF,TIMP,TI1,TFI,TIG,TEG
C COMMON NI(100),NF(100),PERIOD(100),Z(100),NSI(20),R(20),NICT(20)
C COMMON NFCI(20),CT(20),NVA,NA(5),CLASL(5),FK1(5),ALFA1(5),FK2(5)
C COMMON ALFA2(5),TIA(5),TEA(5),FREQ(5),PHASE(5),FK3(5),NVI(5),NVI(5)
C COMMON NCIMP,NICI(9),NFCI(9),NVGRAF,NVG(5),NCGRAF,NICG(5),NECG(5)
C COMMON KP(100),KT(100),KG,NK,VOLTN(50,31),VOLTR(100,31),T,ITL,ITC
C COMMON IT0,Y(200),TIME(200)
C DIMENSION LINE(101)
C DATA JL,JN,JP,JI,JB,JZ/'X','-','+',',','I',' ',' ','$'/'
C
C *****REESCALE DATOS PARA CUBRIR EL RANGO DE LA ORDENADA*****
C
C YMAX=-1.0E+50
C YMIN=1.0E+50
C DO 9 I=1,NF1
C IF(Y(I).GT.YMAX) YMAX=Y(I)
C 9 IF(Y(I).LT.YMIN) YMIN=Y(I)
C IF(YMAX.EQ.YMIN) YMIN=0.0
C RANGE=YMAX-YMIN
C TEMP=100.0/RANGE
C DO 13 I=1,NF1
C 13 Y(I)=(Y(I)-YMIN)*TEMP
C RVV=-YMIN*TEMP
C DO 20 I=1,101
C 20 LINE(I)=JB
C N=1
C GO TO 28
C 27 IF((N-1)/10-(N-2)/10) 37,37,28
C
C *****CONSTRUYA LINEA GRAFICA DE LA ORDENADA*****
C
C 28 ND=0
C DO 34 I=1,10
C ND=ND+1
C LINE(ND)=JP
C DO 34 J=1,9
C ND=ND+1
C 34 LINE(ND)=JN
C LINE(101)=JP
C GO TO 39
C
C *****CONSTRUYA LINEA GRAFICA DE LAS ABCISAS*****
C
C 37 DO 33 I=1,101,10
C 33 LINE(I)=JI
C
C *****CAMBIE DATOS NUMERICOS A LETRAS*****
C
C 39 JA=Y(N)+1.4999999
C IF(JA-101) 43,48,44
C 43 IF(JA) 45,46,48
C 44 LINE(101)=JZ
C GO TO 49
C 45 LINE(I)=JZ
C GO TO 49
C 48 LINE(JA)=JL
C
C *****IMPRESION LINEA DE DATOS*****
C
C 49 IF(Y(N).EQ.RVV) GO TO 70
C Y(N)=Y(N)/TEMP+YMIN
C GO TO 30

```

```
70 Y(N)=0.0  
80 WRITE(3,53) TIME(N),LINE,Y(N)  
53 FORMAT(1H ,E12.5,2X,101A1,1X,E12.5)
```

C
C
C

```
*****PUNSA EN CERO LAS VARIABLES*****
```

```
DO 56 I=1,101  
53 LINE(I)=J0  
N=N+1  
IF(N-NE1) 27,27,61  
61 RETURN  
END
```

3.2.5. Datos de entrada requeridos por el
programa y opciones para los datos
de salida

Los datos de entrada requeridos por el programa y las opciones para los datos de salida son leídos por la SUBROUTINE LEC, a continuación se detalla la manera como deben ingresarse dichos - datos al programa SOB.

En general, todos los datos del sistema deben especificarse en las siguientes unidades*:

Voltajes

Voltios

*Tanto el programa SOB como el programa BERGE (descrito en el capítulo V), es posible trabajar con valores en p.u.; los resultados se obtendrán entonces en p.u. y no en las unidades en la impresión de datos de entrada.

Corrientes	Amperios
Frecuencias	Ciclos/Segundo
Angulos	Grados
Impedancias	Ohmios
Tiempo	Milisegundos

A todas las barras se les debe asignar nombres numéricos, así: 1, 2, 5, etc., no puede dársele el mismo número a dos barras diferentes.

No es posible asignar el valor cero a ninguna impedancia, si el caso lo requiere, se puede usar un número muy pequeño como 1.0×10^{-30} a fin de evitar la división para cero.

El uso del programa requiere la creación de un procedimiento, las cuatro primeras filas de dicho procedimiento deben ser:

```
// LOAD SOB  
  
// FILE NAME-FT00015,RETAIN-T,RECORDS-200,LABEL-  
FILE15.  
  
// FILE NAME-FT00016,REATIN-T,RECORDS-200,LABEL-  
FILE16
```

// RUN

A partir de la quinta fila se ingresan los datos del sistema necesarios para realizar un estudio, a continuación se da una lista de los nombres dados a las variables de entrada.

NN	Número de nodos ($NN \leq 50$)
NLF	Número de líneas finitas ($NLF \leq 50$)
NLSI	Número de líneas semi-infinitas ($NLSI \leq 20$).
NCT	Número de coeficientes de transferencia ($NCT \leq 20$).
IBT	Intervalo Básico de Tiempo (γ).
FINALT	Tiempo final del estudio
TGRAF	Intervalo de graficación
TIMP	Intervalo de impresión
TII	Tiempo inicial de Impresión
TFI	Tiempo final de Impresión
TIG	Tiempo inicial de graficación
TFG	Tiempo final de graficación
NI	Nodo inicial de línea finita
NF	Nodo final de línea finita
PERIOD	Periodo ($PERIOD \leq 30$)
Z	Impedancia de línea finita

NSI	Nodo de líneas semi-infinita
R	Impedancia de línea semi-infinita
NICT	Nodo inicial de coeficiente de - transferencia.
NFCT	Nodo final de coeficiente de trans_ ferencia.
CT	Valor de coeficiente de transfe <u>r</u> encia.
NVA	Número de voltajes aplicados (NVA< 5)
NA	Número del nodo al cual se le apli_ ca un voltaje.
CLASE	Tipo de perturbación

Las claves que permiten escoger el tipo de per_
turbación deseada y que son leídas con formato
A4, son:

EXPO	Onda tipo exponencial
SEN	Onda tipo senoidal
COSE	Onda tipo cosenoidal
ESC	Onda tipo escalón
RAM	Onda tipo rampa

Las ondas tipo exponencial se generan de acuerr

do a la ecuación:

$$e(t) = FK1 \exp(-ALFA1.t) - FK2 \exp(-ALFA2.t)$$

Las ondas tipo senoidal o cosenoidal se generan de acuerdo a las ecuaciones:

$$e(t) = FK1 \text{ Sen } (2\pi \text{ FREQ}.t + \text{PHASE})$$

$$e(t) = FK1 \text{ Cos } (2\pi \text{ FREQ}.t + \text{PHASE})$$

Los ondas tipo escalón se generan de acuerdo a la ecuación:

$$e(t) = FK1$$

Las ondas tipo rampa se generan de acuerdo a la ecuación:

$$e(t) = FK3.t$$

Las unidades de las constantes son:

$$FK1 = FK2 = \text{Voltios}$$

$$FK3 = \text{ Voltios/segundo}$$

ALFA1 = ALFA2 =	1/segundo
FREQ =	Ciclo/segundo
PHASE =	Grados
TIA =	Tiempo al cual se aplica la perturbación.
TFA =	Tiempo al cual cesa la perturbación.
NVIMP =	Número de voltajes que van a imprimirse.
NVI =	Número del nodo cuyo voltaje se va a imprimir.
NCIMP =	Número de corrientes que van a imprimirse (NVIMP + NCIMP \leq 9)
NICI =	Número del nodo inicial de la corriente a imprimirse.
NFCI =	Número del nodo final de la corriente a imprimirse
NVGRAF =	Número de voltajes que van a graficarse (NVGRAF \leq 5)
NVG =	Número del nodo cuyo voltaje se va a graficar.
NCGRAF =	Número de corrientes que van a graficarse (NCGRAF \leq 5)

NICG = Número del nodo inicial de la corriente a graficarse.

NFCG = Número del nodo final de la corriente a graficarse.

El número de valores a graficarse por cada gráfico es de 200, de aquí que sea necesario escoger TGRAF, TIG, TFG de manera tal que el número de puntos a graficarse por variable sea de 200 como máximo.

Es conveniente que los tiempos FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG, TIA, TFA, sean múltiplos enteros de IBT a fin de evitar errores de redondeo durante la ejecución del programa.

Al ingresar los datos acerca de los elementos del sistema, se lo debe hacer en un sólo sentido, es decir, si por ejemplo tenemos una línea finita entre los nodos 1 y 2, deben ingresarse los datos correspondientes en la rama 1, 2 o en la rama 2, 1; pero no en ambas ya que el programa realiza automáticamente esta tarea.

Se optó por usar sentencias FORTRAN para indi-

car el orden y los formatos que se siguen en la lectura de los datos de entrada. A continuación se dan una serie de instrucciones de lectura con sus respectivos formatos así como instrucciones de decisión que permitirán explicar la manera correcta de ingresar los datos de entrada al programa. Según se mencionó anteriormente la lectura de éstos datos comienza a partir de la quinta fila del procedimiento, a cada instrucción READ debe corresponderle en el procedimiento una línea de datos, cuando la instrucción READ se encuentra dentro de un lazo DO, deben existir en el procedimiento tantas líneas de datos, correspondientes a esta instrucción, como veces se ejecuta dicho lazo.

```
READ (4,1) NN, NLF, NLSI, NCT
```

```
READ (4,2) IBT, FINALT, TGRAF, TIMP
```

```
READ (4,2) TII, TFI, TIG, TFG
```

```
IF (NLF.EQ.0) GO TO 5
```

```
DO 3 K = 1, NLF
```

```
3 READ (4,4) NI(K), NF(K), PERIOD(K), Z(K)
```

```
5  IF (NLSI.EQ.O) GO TO 8

    DO 6 K=1, NLSI

6  READ (4,7) NSI(K), R(K)

8  IF (NCT.EQ.O) GO TO 11

    DO 9 K = 1, NCT

9  READ (4,10) NICT(K), NFCT(K), CT(K)

11 READ (4,1) NVA

    IF (NVA.EQ.O) GO TO 13

    DO 12 K= 1, NVA

    READ (4,14) NA(K), CLASE (K)

    IF (CLASE K). EQ. EXPO) GO TO 15

    IF (CLASE(K) EQ.SEN.OR.CLASE (K).EQ.COSE) GO TO 16

    IF (CLASE (K).EQ.ESC) GO TO 17

    IF (CLASE (K) EQ. RAM) GO TO 18

    STOP

15 READ (4,19) FK1(K), ALFA1(K), FK2(K), ALFA2(K),
1TIA(K), TFA(K)

    GO TO 12

16 READ (4,19) FK1(K), FREQ(K), PHASE (K),TIA(K),
1TFA(K)

    GO TO 12

17 READ (4,19)FK1(K),TIA(K),TFA(K)

    GO TO 12

18 READ (4,19) FK3(K), TIA(K), TFA(K)

12 CONTINUE

    GO TO 21
```



```
13  STOP
21  READ (4,1) NVIMP
    IF (NVIMP.EQ.0)
    GO TO 22
    READ (4,1) (NVI(K),K=1, NVIMP)
22  READ (4,1) NCIMP
    IF (NCIMP.EQ.0) GO TO 24
    DO 23 K = 1, NCIMP
23  READ (4,1) NICI(K), NFCI(K)
24  READ (4,1) NVGRAP
    IF (NVGRAF.EQ.0) GO TO 25
    READ (4,1) (NVG(K),K= 1, NVGRAF)
25  READ (4,1) NCGRAF
    IF (NCGRAF.EQ.0) GO TO 27
    DO 26 K = 1, NCGRAF
26  READ (4,1) NICG(K), NFCG (K)
27  RETURN
    1  FORMAT (5I5)
    2  FORMAT (4E10.3)
    4  FORMAT (3I5, E10.3)
    7  FORMAT (I5,E10.3)
   10  FORMAT (2I5, E10,3)
   14  FORMAT (I5,1X,A4)
   19  FORMAT (8E10.3)
    END
```

3.3. EJEMPLOS DE APLICACION DEL PROGRAMA A PROBLEMAS ESPECIFICOS

Para comprobar la efectividad del programa desarrollado se utilizaron varios ejemplos, los cuales se detallan a continuación indicando los resultados - que se obtuvieron en cada caso.

EJEMPLO 1

En la figura 3.3.1, se muestra una red monofásica enmallada, al tiempo $t=0$ se aplica en la barra 3 un voltaje tipo escalón de magnitud 100 Kv, se asume que dicho voltaje es generado por una fuente de impedancia interna nula.

Cada línea tiene indicada su impedancia de sobretensión y su tiempo de tránsito (periodo), este último se expresa como un múltiplo entero del Intervalo Básico de Tiempo (γ), cuyo valor para este ejemplo es de 1 μ seg.

En la figura 3.3.2, se muestra el procedimiento - usado para ingresar los datos de entrada correspondientes a este ejemplo.

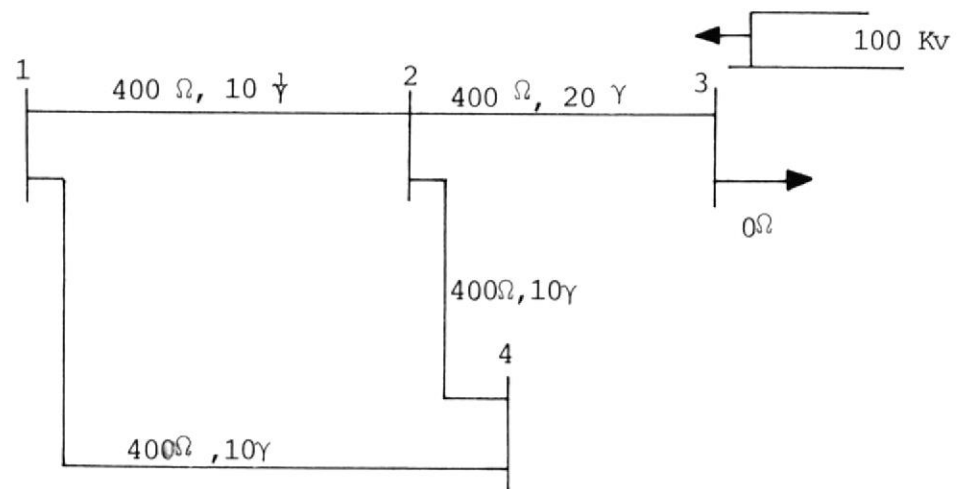


FIGURA 3.3.1. RED MONOFASICA ENMALLADA

FIGURA 3.3.2. HOJA DE DATOS DE ENTRADA

```

S04          T150          DATE 82/12/13          TIME 22.15
// LOAD S04
// FILE NAME=FT00015,RETAIN-T,RECORDS-200,LABEL-FILE15
// FILE NAME=FT00016,RETAIN-T,RECORDS-200,LABEL-FILE16
// RUN
  4      4      1      0
  1.0E-3  160.0E-3  1.0E-3  1.0E-3
 120.0E-3  160.0E-3  0.0  160.0E-3
  1      2      10     400.0
  1      4      10     400.0
  2      3      20     400.0
  2      4      10     400.0
  3      1.0E-20
  1
  3 ESC
 100.0E+3  0.0  130.0E-3
  4
  1      2      3      4
  0
  4
  1      2      3      4
  0
  
```

La impresión de los datos de entrada y de las opciones para los datos de salida muestran en la figura 3.3.3, en las opciones para los datos de salida se indican las columnas en las cuales se van a imprimir los resultados correspondientes a cada variable de salida.

En la figura 3.3.4, se dan los resultados obtenidos para los voltajes en voltios de los 4 nodos desde 121 μ seg hasta 160 μ seg.

Las gráficas de los voltajes correspondientes al nodo 2 y al nodo 4 se muestran en las figuras 3.3.5, y 3.3.6, respectivamente, para tiempos desde 0 hasta 160 μ seg. El voltaje del nodo 1 es idéntico al voltaje del nodo 4 para todo tiempo, según se aprecia en la figura 3.3.4, por lo cual no se incluye el gráfico de voltaje correspondiente al nodo 1, tampoco se incluye el gráfico correspondiente al nodo 3, ya que su voltaje es constante e igual a 100 Kv.

EJEMPLO 2

La figura 3.3.7, muestra una línea monofásica con terminación capacitiva, se escogió este ejemplo ya

 * CALCULO DE SIMULACION DE RESPUESTA DE MODO DE ONDA VIAJAS *
 * *****

LAS UNIDADES SON:

VOLTAJES = VOLTIOS
 CORRIENTES = AMPERIOS
 FRECUENCIAS = CICLOS/SEG
 ANGULOS = GRADOS
 IMPEDANCIAS = OHMS
 TIEMPOS = MILESEGUNDOS

 * INFORMACION DE LAS LINEAS FINITAS *
 * *****

NUMERO DE NODOS = 4
 NUMERO DE LINEAS FINITAS = 4
 NUMERO DE LINEAS SEMI-INFINITAS = 1
 NUMERO DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA = 0

INTERVALO BASICO DE TIEMPO = 0.100E-02
 INTERVALO D. IMPRESION = 0.100E-02
 INTERVALO D. GRAFICACION = 0.100E-02
 TIEMPO INICIAL DE IMPRESION = 0.1E+00
 TIEMPO FINAL DE IMPRESION = 0.100E+02
 TIEMPO INICIAL DE GRAFICACION = 0.000E+00
 TIEMPO FINAL DE GRAFICACION = 0.100E+00
 TIEMPO FINAL DE CALCULO = 0.100E+00

 * INFORMACION DE LAS LINEAS FINITAS *
 * *****

NODO INICIAL	NODO FINAL	PERIODO	IMPEDANCIA
1	2	10	0.400E+03
1	4	10	0.400E+03
2	3	20	0.400E+03
2	4	10	0.400E+03

 * INFORMACION DE LAS LINEAS SEMI-INFINITAS *
 * *****

NODO	IMPEDANCIA
1	0.100E-19

 * INFORMACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIAS *
 * *****

NO EXISTEN COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA EN EL SISTEMA

 * INFORMACION DE LOS VOLTAJES APLICADOS *
 * *****

NUMERO DE VOLTAJES APLICADOS = 1

LAS UNIDADES DE LAS CONSTANTES SON:

FK1 = FK2 = VOLTIOS
 ALFA1 = ALFA2 = 1/SEG
 FK3 = VOLTIOS/SEG
 FREQ = CICLOS/SEG
 PHASE = GRADOS

NO.	NODO	TIPO	FK1	TIEMPO INICIAL	TIEMPO FINAL
1	1	FSC	0.100E+05	0.000E+00	0.100E+00

 * SUPLENES PARA LOS DATOS DE SALIDA *
 * *****

NUMERO DE VOLTAJES A IMPRIMIRSE = 3

COLUMNA NO.	NODO
2	1
3	2
4	3
5	4

NUMERO DE VOLTAJES A GRAFICARSE = 4

NODO
1
2
3
4

FIGURA 3.3.3. IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA

 CORRIENTES Y/O VOLTAJES DE SALIDA

TIEMPO	COLUMNA 2	COLUMNA 3	COLUMNA 4	COLUMNA 5
0.121E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.122E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.123E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.124E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.125E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.126E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.127E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.128E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.129E+00	0.151E+06	0.106E+06	0.100E+06	0.151E+06
0.130E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.131E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.132E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.133E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.134E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.135E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.136E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.137E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.138E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.139E+00	0.116E+06	0.765E+05	0.100E+06	0.116E+06
0.140E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.141E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.142E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.143E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.144E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.145E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.146E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.147E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.148E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.149E+00	0.420E+05	0.823E+05	0.100E+06	0.420E+05
0.150E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.151E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.152E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.153E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.154E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.155E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.156E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.157E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.158E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.159E+00	0.323E+04	0.263E+05	0.100E+06	0.323E+04
0.160E+00	-0.741E+04	0.165E+05	0.100E+06	-0.741E+04

FIGURA 3.3.4. CORRIENTES Y/O VOLTAJES DE SALIDA

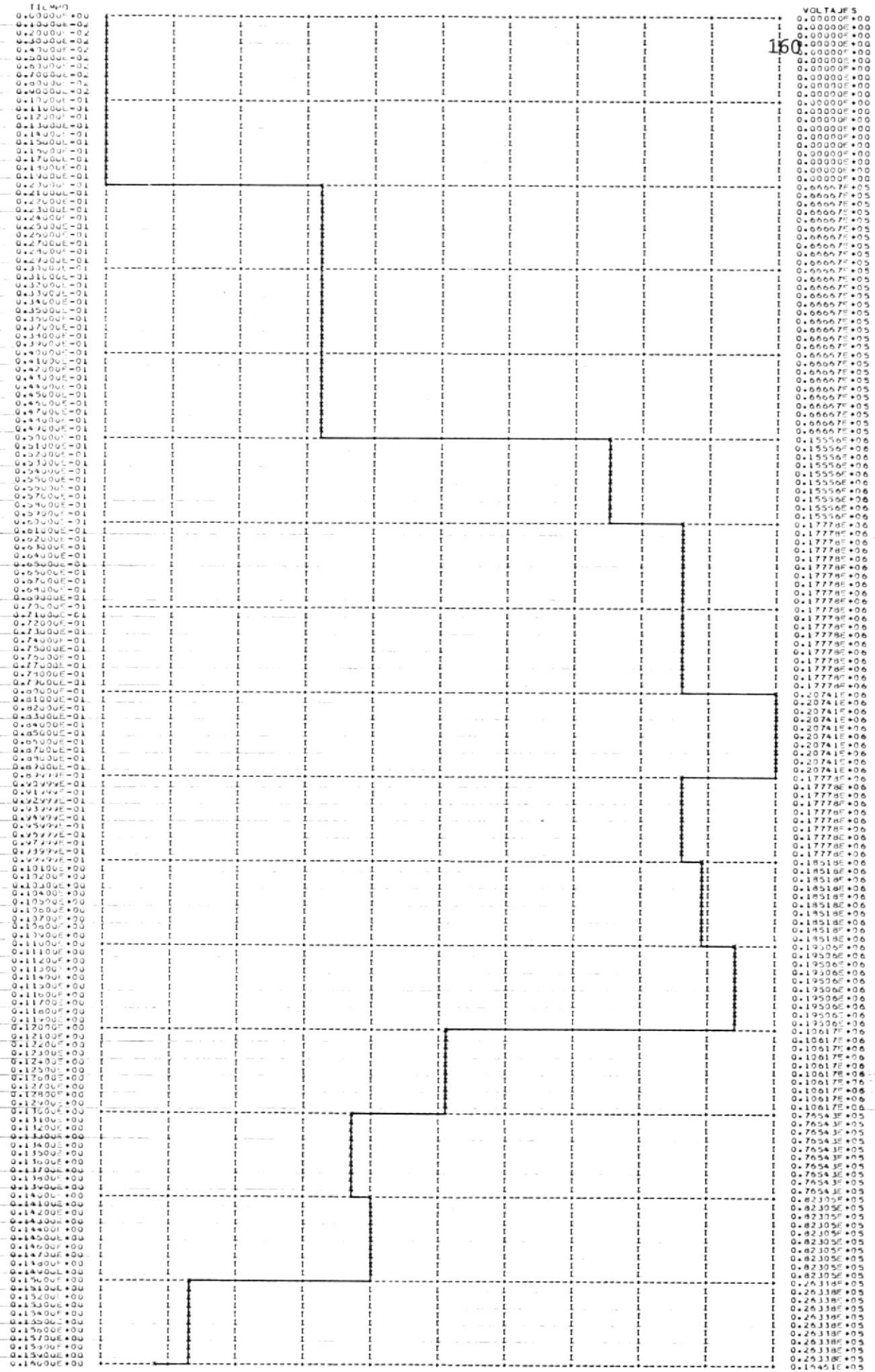


FIGURA 3.3.5. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NUDO N° 2

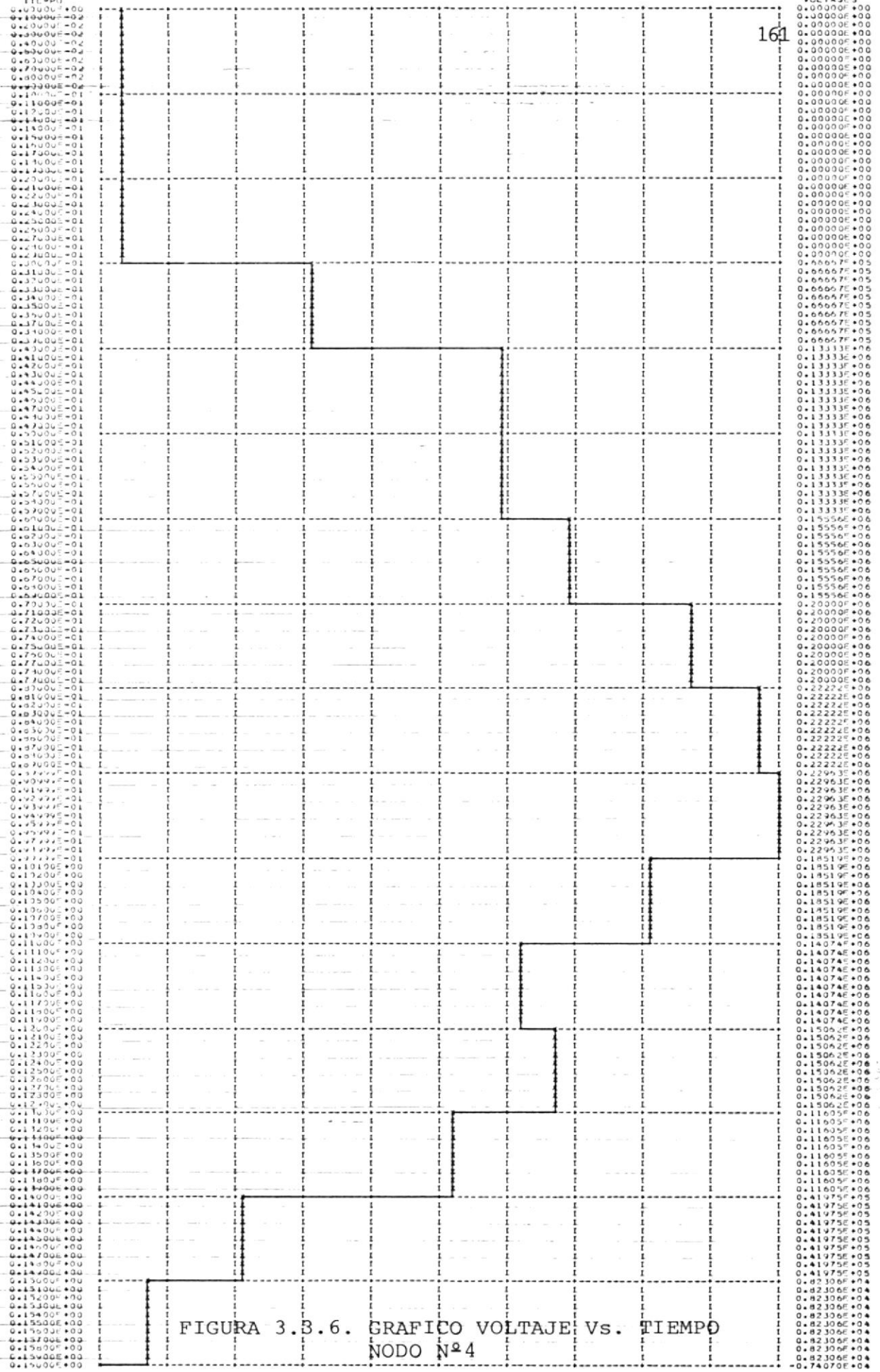


FIGURA 3.B.6. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NUDO N°4

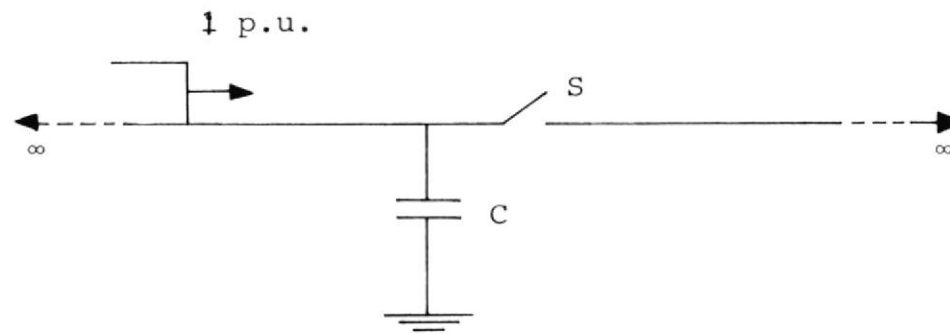


FIGURA 3.3.7. TERMINACION CAPACITIVA DE UNA LINEA MONOFASICA
RED FISICA.

que es de fácil comprobación y permite demostrar la efectividad de los stubs.

Se considera primero que el interruptor S está abierto, si la línea tiene una impedancia de sobretensión R y termina en una capacitancia C , para una onda escalón unitario viajando según se indica en la figura 3.3.7, se puede demostrar que el voltaje del capacitor está dado por:

$$V_C(t) = 2(1 - \exp(-t/RC)) \quad (3.1)$$

La red reducida, cuando el interruptor S está abierto, es la que se indica en la figura 3.3.8. La línea 1,2 se considera infinitamente larga hacia la izquierda, esto es equivalente a tener una línea semi-infinita en el nodo 1 con $R_1 = R$, de manera que el coeficiente de reflexión sea $K_r = 0$ y el de refracción $K_t = 1$, es decir que una onda que viaje desde el nodo 2 hacia el nodo 1, al llegar al nodo 1 no debe reflejarse y continuar su viaje sin cambio alguno.

El valor de R_3 debe ser muy grande puesto que una capacitancia a tierra debe representarse por medio de un stub en circuito abierto, para este ejemplo se usó $R_3 = 1.0 \times 10^{21} \Omega$.

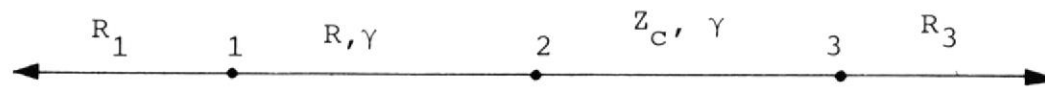


FIGURA 3.3.8. RED REDUCIDA, INTERRUPTOR S ABIERTO

Si la línea tiene $R = 400 \Omega$ y termina en una capacitancia de $C = 1000 \times 10^{-6} \mu\text{F}$, entonces $RC = 4 \times 10^{-7} \text{seg.}$ El valor del Intervalo Básico de Tiempo debe escogerse de manera que sea pequeño comparado con la constante de tiempo RC , se usó $\gamma = 0.2 \times 10^{-4} \text{ m seg.}$, con lo cual el valor de Z_C es:

$$\begin{aligned} Z_C &= \gamma/C \\ &= 0.2 \times 10^{-7} / 1000 \times 10^{-12} \\ &= 20 \Omega \end{aligned}$$

El gráfico del voltaje del capacitor, usando el stub equivalente anteriormente descrito, se muestra en la figura 3.3.9, por medio de la ecuación 3.1, se puede comprobar que los resultados obtenidos son bastante aproximados a los valores reales.

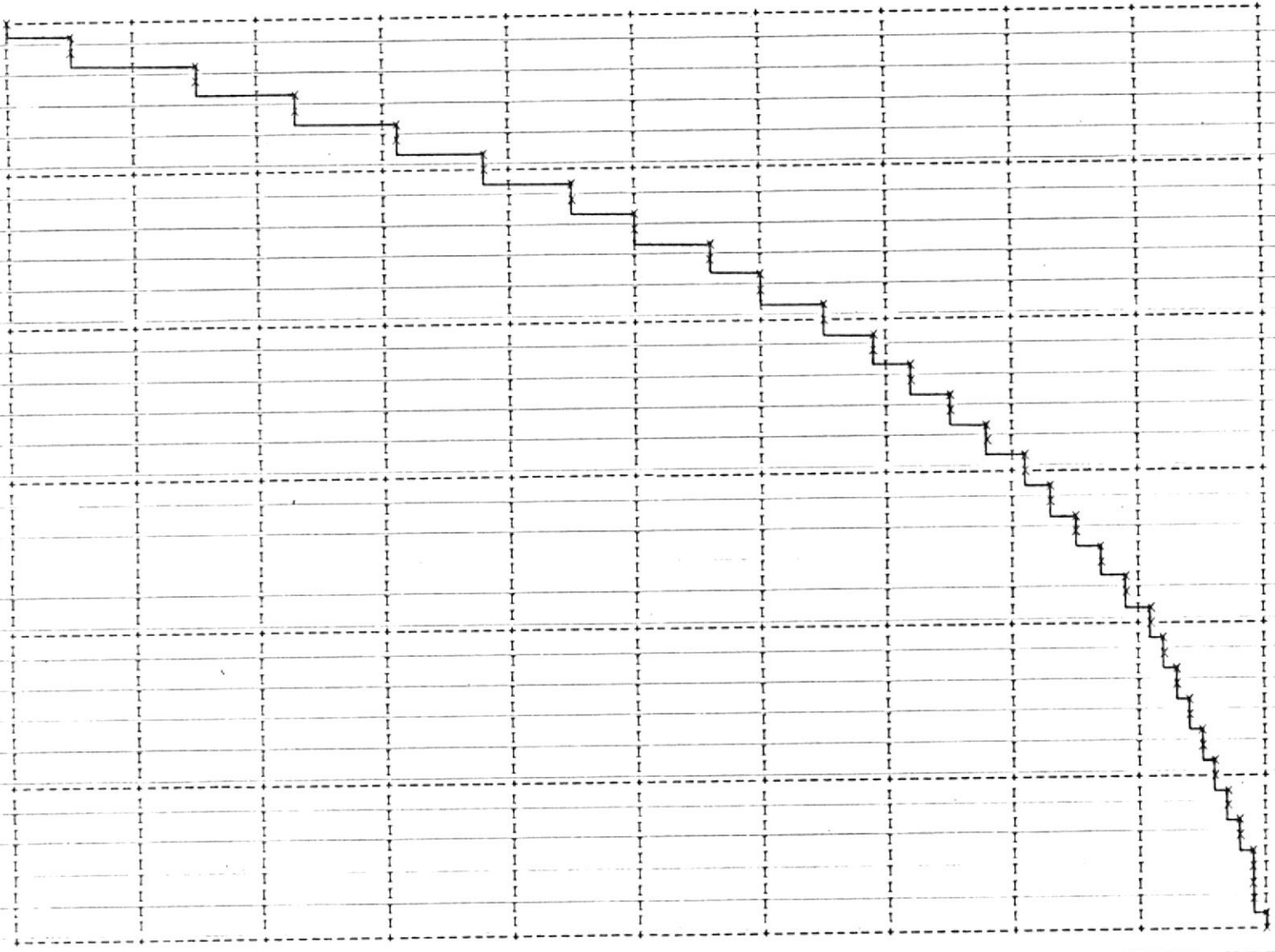
Cuando se cierra el interruptor S, la red reducida es la que se da en la figura 3.3.10, en este caso la solución para el voltaje del capacitor es:

$$V_C(t) = \frac{2R_2}{R_1 + R_2} (1 - \exp(-t/R_p C))$$

GRAFICO VOLTAJE VS TIEMPO

NODO NO. 2

TIEMPO
 0.00000E+00
 0.20000E-04
 0.40000E-04
 0.60000E-04
 0.80000E-04
 0.10000E-03
 0.12000E-03
 0.14000E-03
 0.15000E-03
 0.18000E-03
 0.20000E-03
 0.22000E-03
 0.24000E-03
 0.25000E-03
 0.25000E-03
 0.32000E-03
 0.32000E-03
 0.35000E-03
 0.35000E-03
 0.37000E-03
 0.40000E-03
 0.42000E-03
 0.44000E-03
 0.45000E-03
 0.45000E-03
 0.50000E-03
 0.52000E-03
 0.54000E-03
 0.55000E-03
 0.55000E-03
 0.60000E-03
 0.62000E-03
 0.64000E-03
 0.65000E-03
 0.65000E-03
 0.70000E-03
 0.70000E-03
 0.74000E-03
 0.74000E-03
 0.75000E-03
 0.75000E-03
 0.80000E-03
 0.82000E-03
 0.84000E-03
 0.85000E-03
 0.85000E-03
 0.90000E-03
 0.92000E-03
 0.94000E-03
 0.95000E-03
 0.95000E-03
 0.10000E-02
 0.10000E-02
 0.10400E-02
 0.10600E-02
 0.10600E-02
 0.11000E-02
 0.11000E-02
 0.11400E-02
 0.11400E-02
 0.11800E-02
 0.12000E-02



VOLTAJES
 0.00000E+00
 0.95238E-01
 0.95238E-01
 0.27664E+00
 0.27664E+00
 0.44077E+00
 0.44077E+00
 0.58927E+00
 0.58927E+00
 0.72363E+00
 0.72363E+00
 0.84519E+00
 0.84519E+00
 0.95517E+00
 0.95517E+00
 0.10547E+01
 0.10547E+01
 0.11447E+01
 0.11447E+01
 0.11447E+01
 0.12262E+01
 0.12262E+01
 0.12262E+01
 0.12999E+01
 0.12999E+01
 0.13665E+01
 0.13665E+01
 0.13665E+01
 0.14269E+01
 0.14269E+01
 0.14269E+01
 0.14815E+01
 0.14815E+01
 0.14815E+01
 0.15308E+01
 0.15308E+01
 0.15308E+01
 0.15755E+01
 0.15755E+01
 0.15755E+01
 0.16159E+01
 0.16159E+01
 0.16159E+01
 0.16525E+01
 0.16525E+01
 0.16525E+01
 0.16856E+01
 0.16856E+01
 0.16856E+01
 0.17156E+01
 0.17156E+01
 0.17156E+01
 0.17426E+01
 0.17426E+01
 0.17426E+01
 0.17672E+01
 0.17672E+01
 0.17672E+01
 0.17893E+01
 0.17893E+01
 0.17893E+01
 0.18094E+01
 0.18094E+01
 0.18094E+01
 0.18275E+01
 0.18275E+01
 0.18275E+01
 0.18440E+01
 0.18440E+01
 0.18440E+01
 0.18588E+01
 0.18588E+01
 0.18588E+01
 0.18723E+01
 0.18723E+01
 0.18723E+01
 0.18844E+01
 0.18844E+01
 0.18844E+01
 0.18954E+01
 0.18954E+01
 0.18954E+01

FIGURA 3.3.9. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N° 2

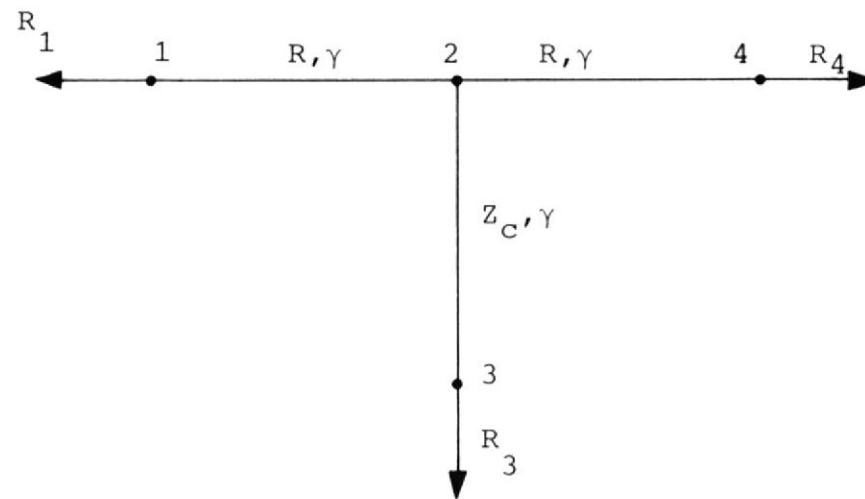


FIGURA 3.3.10. RED REDUCIDA, INTERRUPTOR S CERRADO

donde:

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

En el ejemplo actual:

$$R_1 = R_2 = R = 400 \Omega$$

Por lo tanto:

$$R_p = R/2$$

$$V(t) = 1 - \exp(-2t/RC) \quad (3.2)$$

El valor de R_4 debe ser de 400Ω ya que la línea 2,4; al igual que la línea 1,2; se considera infinita. Con el mismo valor anteriormente usado para γ , el gráfico del voltaje del capacitor (en p.u.) en función del tiempo (en mseg) cuando se usa el stub equivalente es el que se da en la figura 3.3.11., los valores obtenidos pueden verificarse usando la ecuación 3.2.

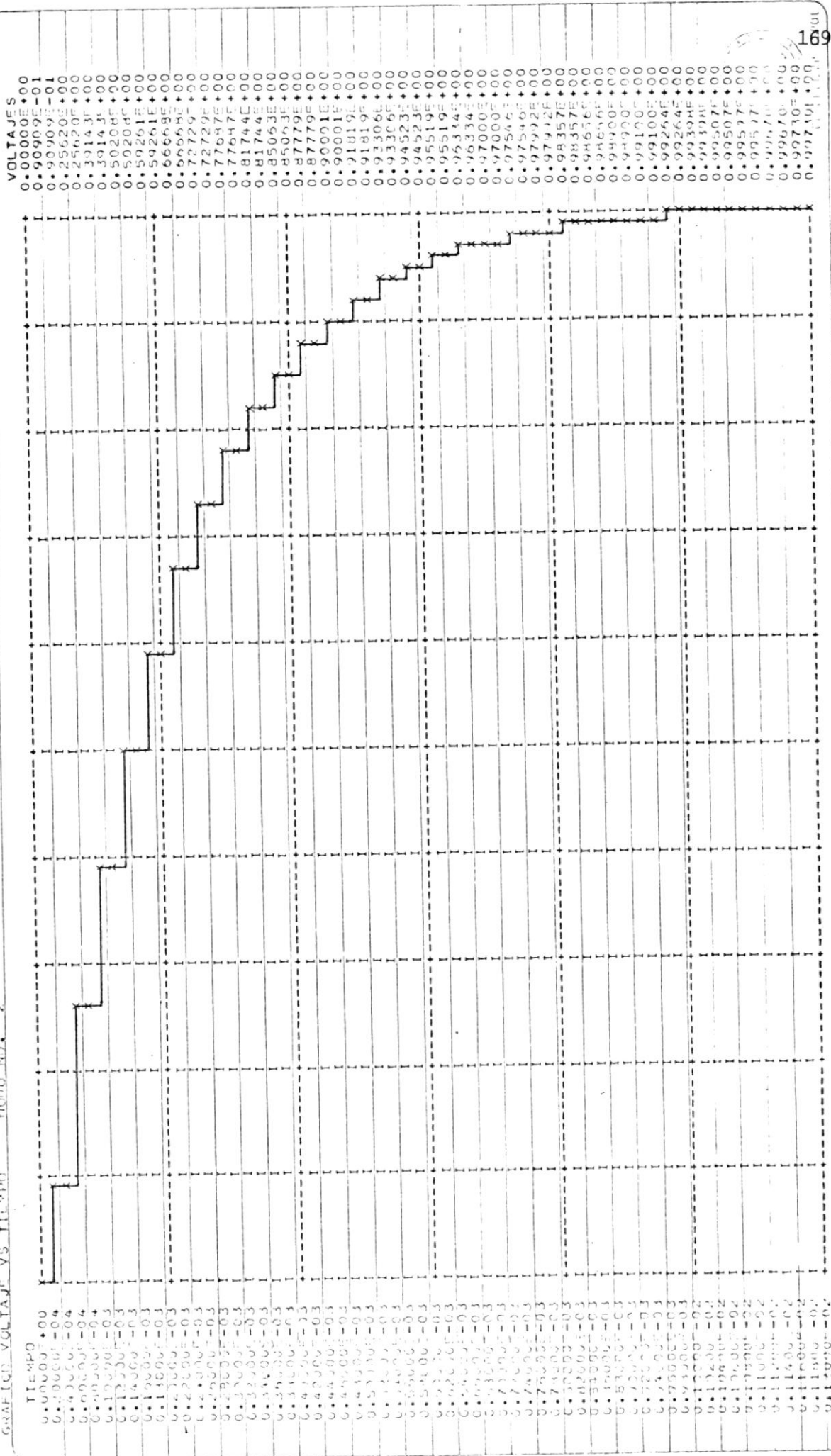


FIGURA 3.3.11. GRAFICO VOLTAJE VS. TIEMPO NODO NDA 2

EJEMPLO 3

En la figura 3.3.12, se muestra una línea monofásica con terminación LC, las constantes usadas son:
 $R = 400 \Omega$, $C = 4 \times 10^{-8} \text{F}$ y $L = 0.01 \text{H}$.

Las constantes de tiempo involucradas en este ejemplo son:

$$RC = 1.6 \times 10^{-5} \text{ seg}$$

$$L/R = 2.5 \times 10^{-5} \text{ seg}$$

$$2\pi\sqrt{LC} = 1.26 \times 10^{-4} \text{ seg}$$

El tiempo de tránsito de los stubs debe ser pequeño comparado con la frecuencia natural de oscilación , usando:

$$\gamma = 0.1 \times 10^{-5} \text{ seg}$$

Las impedancias de los stubs inductivo y capacitivo son:

$$Z_1 = L/\gamma$$

$$= 0.01/1 \times 10^{-6} = 10000 \Omega$$

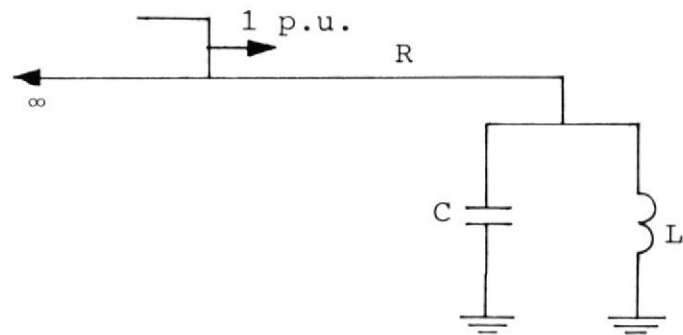


FIGURA 3.3.12. LINEA MONOFASICA CON TERMINACION LC, RED FISICA

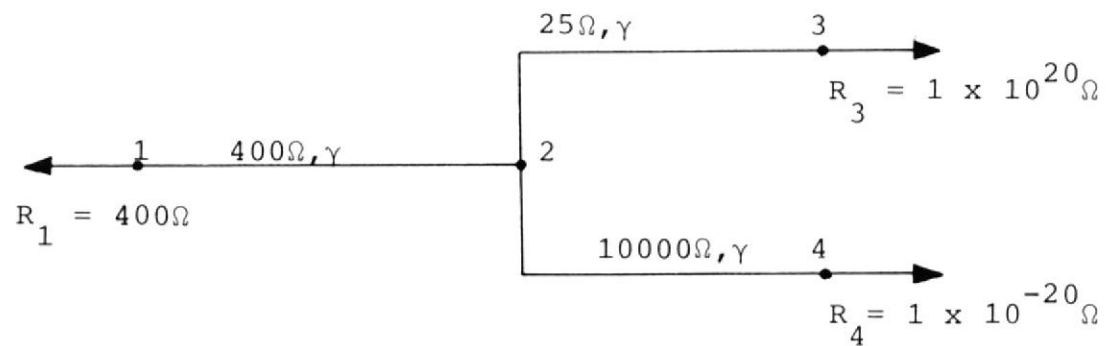


FIGURA 3.3.13. LINEA MONOFASICA CON TERMINACION LC, RED REDUCIDA

$$Z_C = \gamma/C$$

$$= 1 \times 10^{-6}/4 \times 10^{-8} = 25 \Omega$$

En la figura 3.3.14, se da el voltaje (en p.u.) del nodo 2 en función del tiempo (en mseg) se usan los stubs equivalentes anteriormente descritos.

EJEMPLO 4

La figura 3,3,15, muestra la energización de una red monofásica enmallada, las variables de interés son las tensiones en las barras 2, 3 y 4 indicadas en la figura.

La solución se obtuvo en base a un Intervalo Básico de Tiempo $\gamma = 0.161$ mseg, los datos son los siguientes:

$$e(t) = \text{Sen}(2\pi ft + \alpha) \quad Z = 1.0 \text{ p.u.}$$

$$f = 50 \text{ ciclos/seg} \quad n_1 = 10$$

$$\alpha = 0 \quad n_2 = 5$$

Los gráficos de los voltajes (en p.u.) en función -

GRAFICO VOLTAJE VS TIEMPO

NODO NO. 2

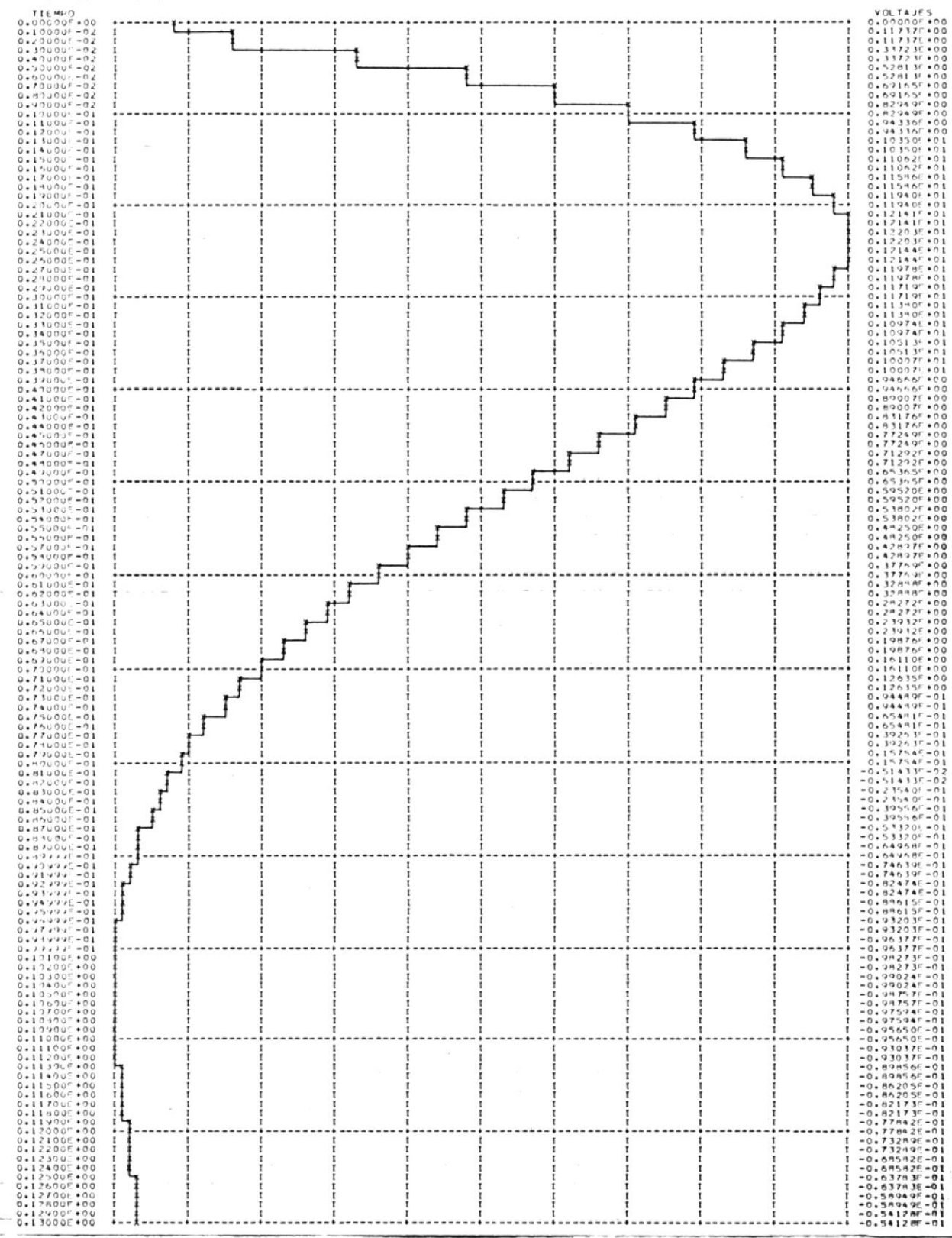


FIGURA 3.3.14. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N° 2

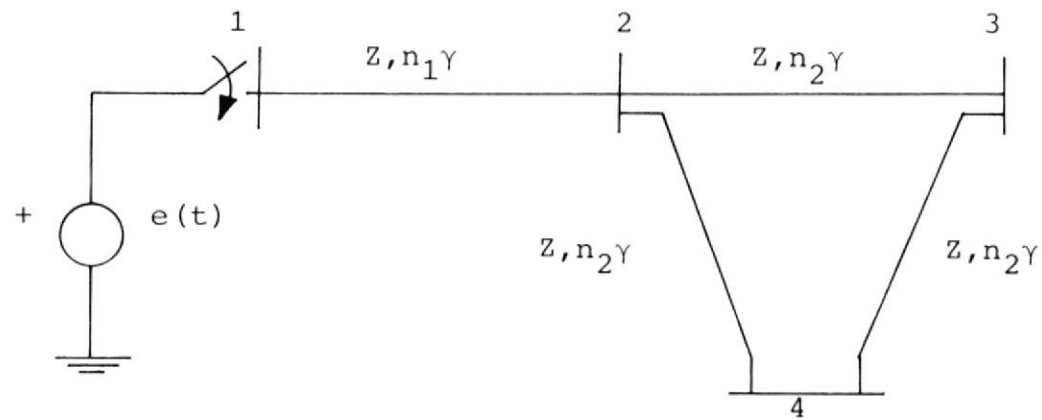


FIGURA 3.3.15. ENERGIZACION DE UNA RED MONOFASICA ENMALLADA

del tiempo (en mseg), para los nodos 2, 3 y 4 se dan en las figuras 3.3.16 a 3.3.18.

3.4. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados obtenidos en los ejemplos anteriores se realizó en diversas formas.

En el Ejemplo 1, se comprobaron los valores de tensión en los 4 nodos para las primeras 10 iteraciones, realizando el cálculo en forma manual. Se comprobó que los resultados obtenidos son correctos - notándose tan solo pequeñas diferencias causadas - por la truncación de los resultados.

El mismo problema del Ejemplo 1, se resolvió con el programa de computación basado en el Método de Bergerón, que se explica en los Capítulos IV y V, comprobándose que los resultados tienen diferencias despreciables. También se empleó esta forma de comprobación para el Ejemplo 4, con resultados igualmente satisfactorios.

Los ejemplos 2 y 3 pueden verificarse de una manera

GRAFICO VOLTAJE VS TIEMPO NODO NO. 2

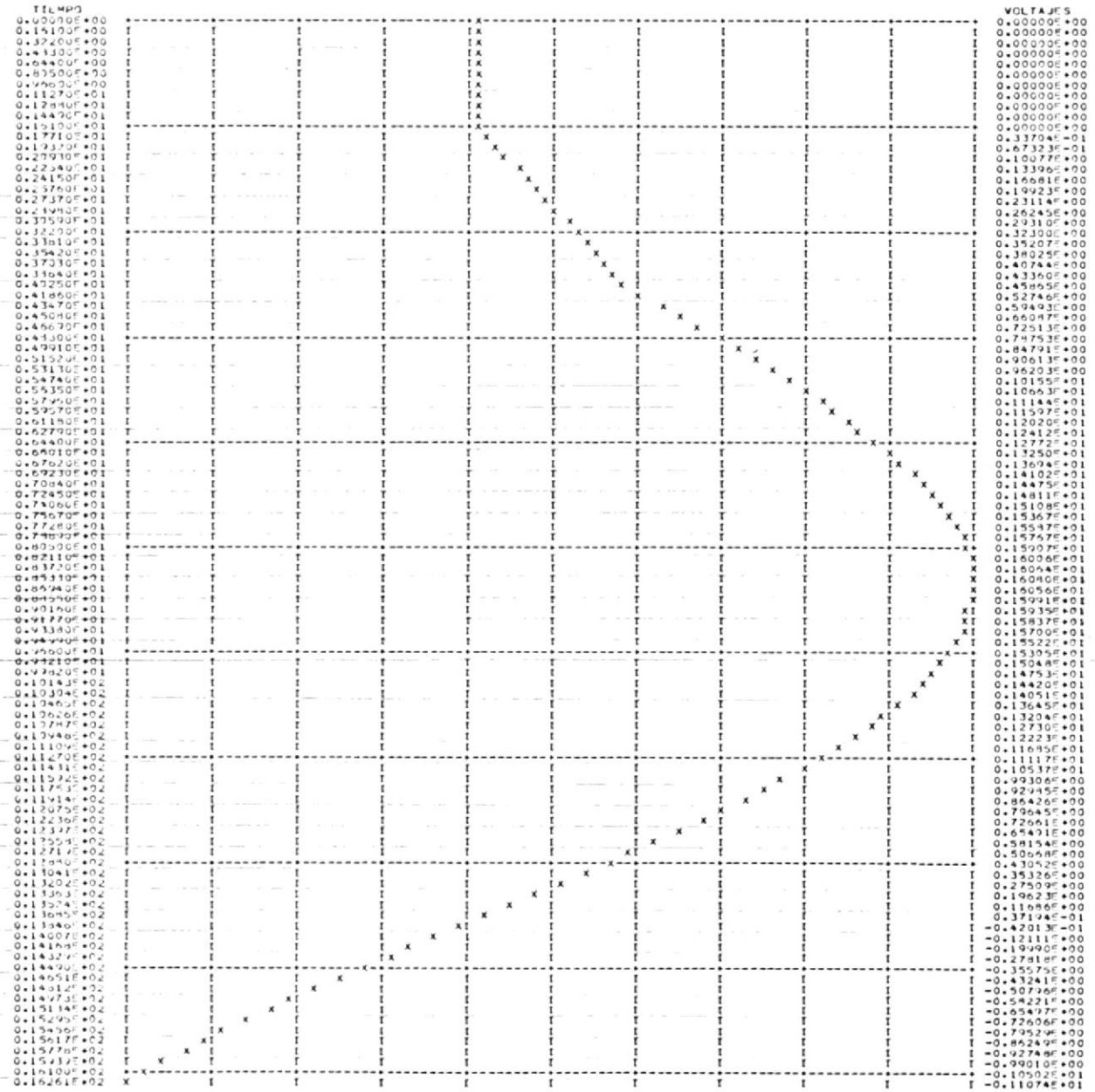


GRAFICO VOLTAJE VS TIEMPO

NODO NO. 3

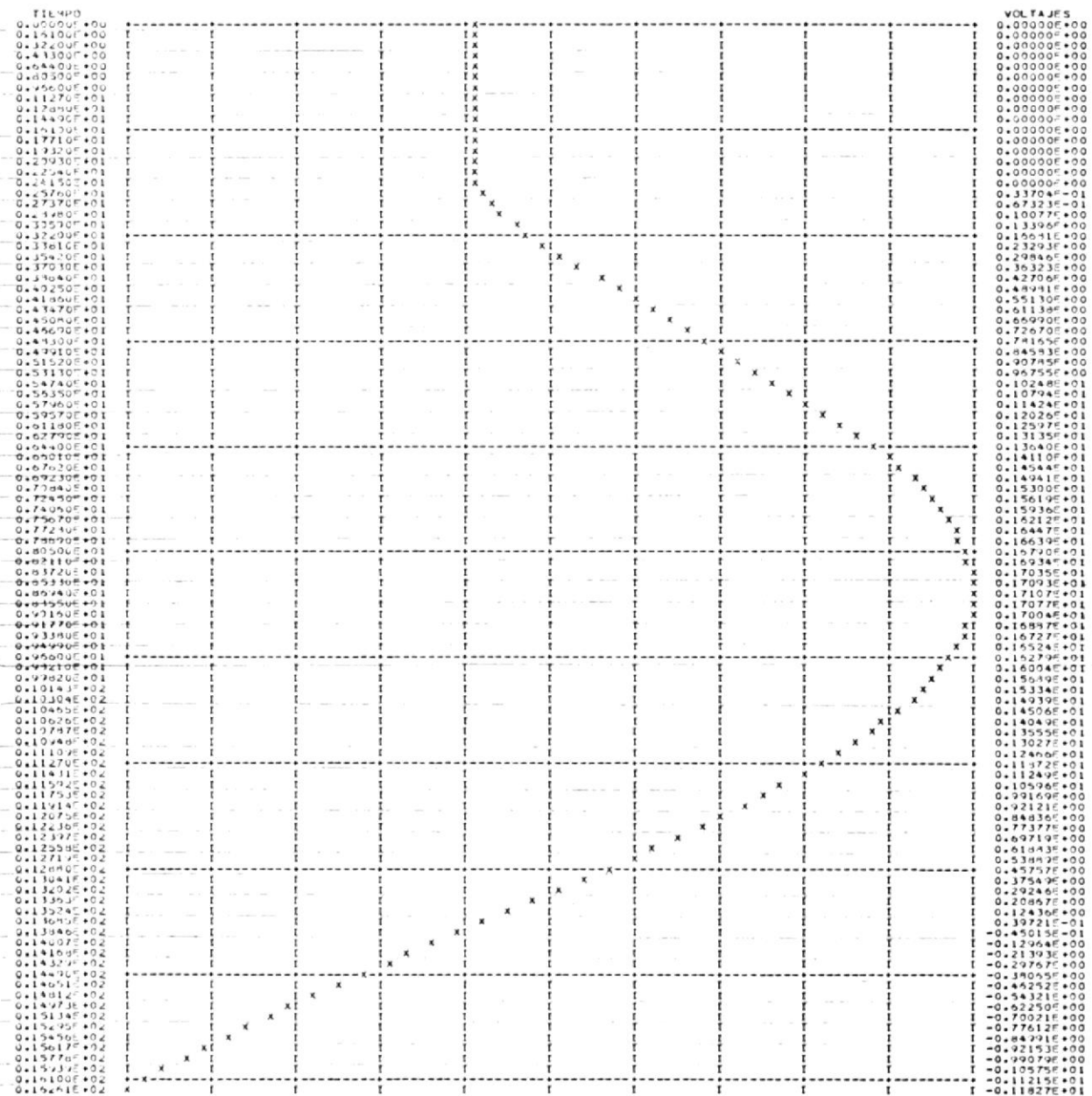


FIGURA 3.3.17. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N°3



directa, ya que es posible obtener la solución analítica de las variables de interés, en estos ejemplos se encontraron diferencias más acentuadas causadas por el uso de los stubs para la aproximación de los elementos concentrados, el grado de aproximación depende de cuan pequeño sea posible hacer el tiempo de tránsito de los stubs, pero existe la limitación de que una vez escogido dicho tiempo de tránsito, el Intervalo Básico de Tiempo queda determinado.

La mayor exactitud se obtiene cuando γ se hace igual al tiempo de tránsito de los stubs, esto trae consigo el inconveniente de que estando el período de las líneas limitado a 30γ y si γ es muy pequeño es bastante probable que exista un período mayor que 30γ . Esta limitación puede superarse usando barras artificiales, por ejemplo, una rama con un tiempo de tránsito de 40γ puede representarse por dos ramas con tiempos de tránsito de 30γ y 10γ respectivamente, conectadas por medio de una barra artificial, sin embargo esto incrementa el número de nodos del sistema y también existe un límite en el número de nodos.

CAPITULO IV

METODO DE BERGERON PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO UNA COMPUTADORA DIGITAL

4.1. ANTECEDENTES HISTORICOS DEL METODO DE BERGERON

El método de Bergerón empleado en el programa, que se expone en el Capítulo V, para calcular sobretensiones transitorias en un sistema eléctrico de potencia, se desarrolló inicialmente como método gráfico en el año de 1928, por SCHNYDER y BERGERON, quienes trabajaron en forma paralela, con el fin de aplicarlo a problemas de cálculos hidráulicos, tal como las sollicitaciones transientes en cañerías de presión. Posteriormente éste método fue aplicado a problemas eléctricos, particularmente para resolver problemas de fenómenos transientes en sistemas de transmisión de energía.

El método de Bergerón ofrece algunas ventajas en relación a otros métodos empleados en el estudio de dichos fenómenos.

Los programas para computadora digital, desarrollados en base a éste método tienen características - que los hacen ventajosos en relación a otros. Permiten obtener las tensiones, corrientes y tiempos de respuesta de fenómenos, considerando parámetros concentrados y distribuidos.

En base a ésta teoría, W.FREY y P. ALTHAMER, en el año de 1961 desarrollaron un trabajo en el cual exponen los resultados de aplicar el método de Bergerón al cálculo de sobretensiones transitorias en redes monofásicas, considerando pararrayos. Los autores explican como el método, que fue concebido - originalmente como método gráfico, puede modificarse para ser adaptado a los requerimientos de una computadora digital.

Posteriormente, en 1966, H.W.DOMMEL, presenta un estudio en el cual se describe un método para resolver fenómenos transientes en sistemas trifásicos, a pesar de que su principal aplicación es para sistemas de potencia, éste puede ser usado para resolver problemas transitorios en cualquier otro tipo de redes lineales.

El método está basado en el procedimiento de inte-

gración "paso a paso" para los parámetros concentra- dos y en las ideas de Bergerón para las líneas sin pérdidas.

En el estudio se consideran, el cierre simultáneo en la operación de interruptores y la inclusión de para- rrayos. Los parámetros de las líneas, los cuales - constituyen los datos de entrada para el estudio - transiente, deben ser obtenidos realizando los cálcu- los adecuados. Se contemplan aquí, modelos para los elementos concentrados y distribuidos, elementos no lineales, diferentes condiciones iniciales y algunos alcances para considerar la dependencia de los pará- metros con la frecuencia.

En 1967, F.H. BRANIN, Jr., presenta un breve trabajo en el cual se destacan las ventajas de la aplicación del método de Bergerón a problemas que involucran fe- nómenos transientes en líneas de transmisión unifor- mes y sin pérdidas. En éste trabajo se demuestra que el método de Bergerón es superior, tanto en velocidad como en exactitud, al familiar método de integrar las ecuaciones diferenciales que describen un modelo LC concentrado para las líneas, pero que no es aplicable a las líneas sin pérdidas.

Nuevamente, H.W.DOMMEL, en el año de 1969, da a conocer un trabajo, basado en su investigación anterior, en el cual se describe la técnica para resolver transientes electromagnéticos en redes monofásicas o trifásicas, usando la matriz admitancia de nodos. La formulación está basada en el método de Bergerón para los parámetros distribuidos y en la regla trapezoidal de integración para los parámetros concentrados. En la solución se usan, la factorización triangular óptimamente ordenada y técnicas de matrices dispersas.

J.K.SNELSON, en el año de 1971, describe una extensión del método de Bergerón que es aplicable al análisis de líneas de transmisión con parámetros dependientes de la frecuencia. Este método puede incluirse en programas existentes de propósito general que usan el método de Bergerón, se discute la aplicación a líneas transpuestas monofásicas y trifásicas, y se desarrolla la teoría para líneas trifásicas no transpuestas.

Además, en círculos especializados, gozan de gran prestigio los programas para computador digital desarrollados; en base al método de Bergerón, por

la Bonneville Power Administration (BPA) y por el Instituto Tecnológico de Munich, Alemania, para analizar transientes en sistemas de potencia y circuitos electrónicos. Entre las mejores características de los programas desarrollados para el cálculo de sobretensiones transitorias, se destacan:

- Consideración de elementos no lineales
- Gran número de maniobras durante el período transiente.
- Variedad en las condiciones iniciales.
- Gran flexibilidad en especificar voltajes y corrientes de excitación con diferentes formas de onda.
- Consideración del efecto corona y retorno por tierra.

Sin embargo, a pesar de las múltiples ventajas que ofrece el método de Bergerón, en su aplicación a la resolución de problemas transientes, el autor de esta tesis no conoce que en nuestro medio, hasta la fecha, se hallan efectuado investigaciones o

trabajos referentes al uso de dicho método en el cálculo de sobretensiones transitorias, se estima que ésta tesis constituirá la base para extender los programas desarrollados a problemas más complejos y de aplicación a los sistemas eléctricos nacionales.

4.2. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA LINEA SIN PERDIDAS

La solución para líneas con resistencia en serie y conductancia en paralelo presenta dificultades considerables, por ésta razón se despreciarán las pérdidas en las líneas, además se asume que los parámetros de las líneas no varían con la frecuencia, es decir se asume que dichos parámetros son constantes.

Considerémos una línea sin pérdidas, con inductancia L y capacitancia C por unidad de longitud, luego, en un punto x a lo largo de la línea, el voltaje y la corriente están relacionados por:

$$-\partial e / \partial x = L (\partial i / \partial t) \quad (4.1)$$

$$-\partial i / \partial x = C (\partial e / \partial t) \quad (4.2)$$

donde:

x = distancia sobre la línea desde algún punto arbitrariamente escogido.

$e = e(x,t)$ = voltaje instantáneo a la distancia x y al tiempo t .

$i = i(x,t)$ = corriente instantánea a la distancia x y al tiempo t .

L = inductancia por unidad de longitud.

C = capacitancia por unidad de longitud.

Eliminando una de las variables en las ecuaciones (4.1) y (4.2), se obtiene:

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (4.4)$$

Las soluciones de las ecuaciones (4.3) y (4.4) son de la forma:

$$i(x,t) = f_1(x-vt) + f_2(x+vt) \quad (4.5)$$

$$e(x,t) = Z.f_1(x-vt) - Z.f_2(x + vt) \quad (4.6)$$

donde:

$$Z = \sqrt{L/C} = \text{Impedancia característica de la línea.}$$

$$v = 1/\sqrt{LC} = \text{Velocidad de propagación.}$$

$f_1(x-vt)$ y $f_2(x+vt)$ son funciones arbitrarias de las variables $(x-vt)$ y $(x+vt)$. Físicamente, $f_1(x-vt)$ puede interpretarse como una onda que viaja en la dirección positiva de las x , a una velocidad v y $f_2(x+vt)$ como una onda que viaja en la dirección negativa de las x , a la misma velocidad v .

Multiplicando por Z la ecuación (4.5) y sumándola con la ecuación (4.6), se obtiene:

$$\begin{aligned} Z.i(x,t) &= Z.f_1(x-vt) + Z.f_2(x+vt) \\ \frac{e(x,t)}{e(x,t)+Z.i(x,t)} &= \frac{Z.f_1(x-vt) - Z.f_2(x+vt)}{2Z.f_1(x-vt)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Multiplicando por $-Z$ la ecuación (4.5) y sumándola con la ecuación (4.6) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 -Z.i(x,t) &= -Z.f_1(x-vt) - Z.f_2(x+vt) \\
 \frac{e(x,t)}{e(x,t)-Z.i(x,t)} &= \frac{Z.f_1(x-vt) - Z.f_2(x+vt)}{-2Z.f_2(x+vt)} \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

En la ecuación (4.7), notamos que la expresión $(e + Z.i)$ es constante cuando $(x - vt)$ es constante, igualmente en la ecuación (4.8), la expresión $(e - Z.i)$ es constante cuando $(x + vt)$ es constante.

Las expresiones $(x - vt) = \text{cte.}$ y $(x + vt) = \text{cte.}$, son llamadas las características de las ecuaciones diferenciales, de aquí que al método de Bergerón - se lo conozca también como el método de las características.

La ecuación (4.7) puede ser interpretada de la siguiente manera:

Consideremos un observador ficticio viajando a lo largo de la línea en la dirección positiva de las x y a la misma velocidad v con que las ondas se propagan, entonces para éste observador $(x-vt)$ y en consecuencia $(e + Z.i)$ serán constantes, una in

interpretación semejante se le puede dar a la ecuación (4.8), considerando un observador que viaje en la dirección negativa de las x , es decir:

Si:

$$x - vt = \text{cte.} \rightarrow e(x,t) + Z.i(x,t) = \text{cte.}$$

$$x + vt = \text{cte.} \rightarrow e(x,t) - Z.i(x,t) = \text{cte.}$$

Lo anterior se puede aplicar a una línea de transmisión cualquiera, sin pérdidas, cuya impedancia característica sea Z y con un tiempo de tránsito ζ , tal que:

$$\zeta = 1/v = 1/\sqrt{LC}$$

Donde:

l = longitud de la línea.

Representando ahora la línea por un cuadripolo, tal como se muestra en la figura 4.1.

Como el tiempo de tránsito de la línea es ζ , enton-

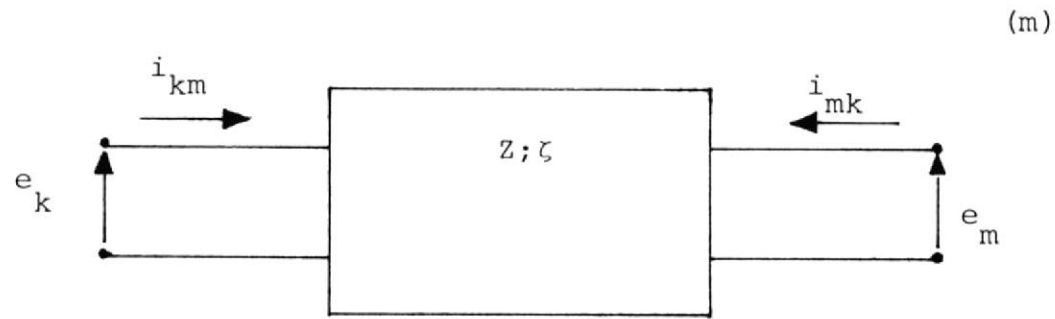


FIGURA 4.1. REPRESENTACION DE UNA LINEA POR UN CUADRIPOLO

ces la expresión $(e + Z.i)$ encontrada por el observador ficticio en el nodo (k) al tiempo $(t-\zeta)$ debe ser la misma que el encuentra al arribar al nodo (m) al tiempo (t) . Algo similar ocurre si se considera una onda que sale del extremo (m) al tiempo $(t-\zeta)$ y llega al extremo (k) al tiempo (t) , de lo anterior se puede establecer que:

$$e_k(t-\zeta) + Z.i_{km}(t-\zeta) = e_m(t) - Z.i_{mk}(t) \quad (4.9)$$

$$e_m(t-\zeta) + Z.i_{mk}(t-\zeta) = e_k(t) - Z.i_{km}(t) \quad (4.10)$$

Despejando $i_{mk}(t)$ de la ecuación (4.9) e $i_{km}(t)$ de la ecuación (4.10), se obtiene:

$$i_{mk}(t) = 1/Z \{e_m(t) - e_k(t-\zeta) - Z.i_{km}(t-\zeta)\} \quad (4.11)$$

$$i_{km}(t) = 1/Z \{e_k(t) - e_m(t-\zeta) - Z.i_{mk}(t-\zeta)\} \quad (4.12)$$

Definiendo:

$$I_{mk}(t-\zeta) = - \{e_k(t-\zeta)/Z + i_{km}(t-\zeta)\}$$

$$I_{km}(t-\zeta) = - \{ e_m(t-\zeta)/Z + i_{mk}(t-\zeta) \}$$

Reemplazando $I_{mk}(t-\zeta)$ en la ecuación (4.11) e $I_{km}(t-\zeta)$ en la ecuación (4.12), se obtienen las ecuaciones recursivas para las corrientes (o las tensiones) en ambos extremos de la línea:

$$i_{mk}(t) = e_m(t)/Z + I_{mk}(t-\zeta) \quad (4.13)$$

$$i_{mk}(t) = e_k(t)/Z + I_{km}(t-\zeta) \quad (4.14)$$

En las ecuaciones (4.13) y (4.14), observamos que para calcular las corrientes en ambos extremos de la línea en el instante t , debemos conocer los valores de I_{km} e I_{mk} , los cuales pueden determinarse de la "historia pasada" al tiempo $(t - \zeta)$, que depende del tiempo de tránsito de la línea.

A partir de las ecuaciones (4.13) y (4.14), se puede representar el circuito equivalente para una línea de transmisión sin pérdidas, el cual se muestra en la figura 4.2.



FIGURA 4.2.a. LINEA MONOFÁSICA SIN PERDIDAS

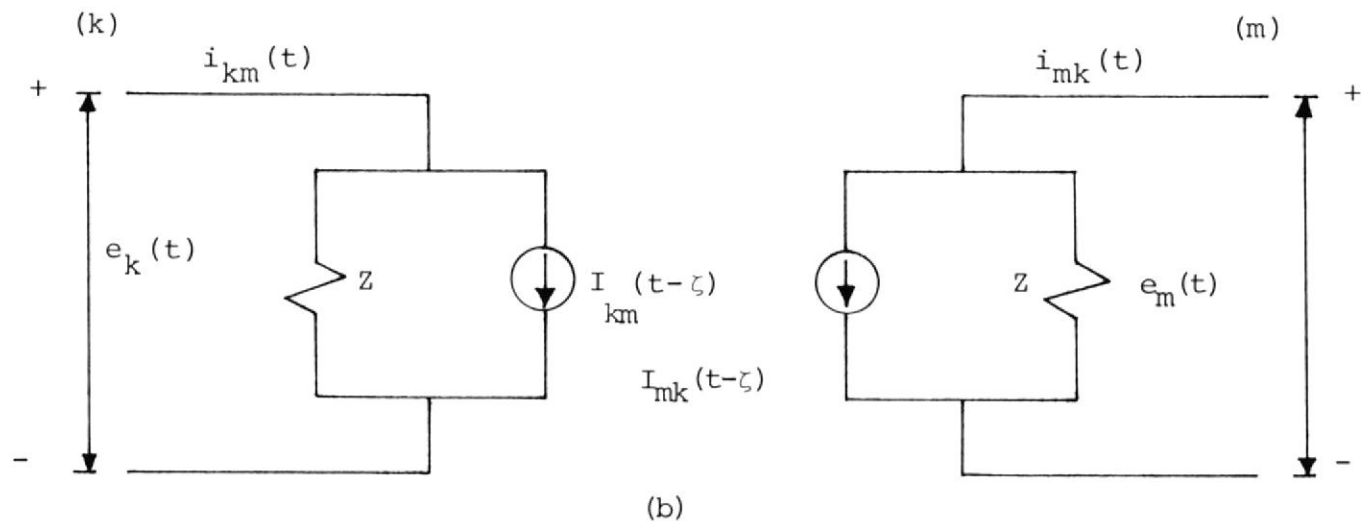


FIGURA 4.2.b. CIRCUITO EQUIVALENTE

La figura 4.2, muestra el circuito equivalente que describe completamente a una línea sin pérdidas en sus terminales. Topológicamente los terminales no se encuentran conectados; las condiciones en el terminal opuesto son "vistas" solamente de manera indirecta y con un atraso de tiempo ζ a través de las fuentes equivalentes de corriente.

Considerémos ahora el caso de energización de una línea con carga atrapada, la condición previa a la energización es:

$$i_{km}(0^-) = i_{mk}(0^-) = 0$$

$$e_k(0^-) = e_m(0^-) = V_0$$

Si asumimos que la línea es ideal, las anteriores condiciones permanecerán inalteradas por un tiempo indefinido, a menos que existan causas externas que las modifiquen. Cuando se realiza la energización, las nuevas condiciones serán:

$$i_{km}(0^+) \neq 0 \quad i_{mk}(0^+) = 0$$

$$e_k(0^+) = e(t) \quad e_m(0^+) = V_0$$

De acuerdo a la ecuación (4.13):

$$i_{km}(0^+) = e_k(0^+)/Z + I_{km}(0^+ - \zeta)$$

es necesario determinar el valor de la fuente de corriente I_{km} en el instante $t = -\zeta$. Empleando las ecuaciones:

$$I_{km}(t - \zeta) = - \{e_m(t - \zeta)/Z + i_{mk}(t - \zeta)\}$$

$$I_{mk}(t - \zeta) = - \{e_k(t - \zeta)/Z + i_{km}(t - \zeta)\}$$

es posible calcular los valores de las fuentes de corriente durante el periodo inicial, pero debemos tener presente que dadas las características ideales de la línea, los valores de tensión y corriente en el instante $t = -\zeta$, son los mismos que en el instante $t = 0^-$ en ambos extremos de la línea. De éste modo se obtiene:

$$I_{km}(\text{inicial}) = -\{e_m(0^-)/Z + i_{mk}(0^-)\} = -V_0/Z$$

$$I_{mk}(\text{inicial}) = -\{e_k(0^-)/Z + i_{km}(0^-)\} = -V_0/Z$$

Para $t = 0^+$, se tendrá:

$$i_{km}(0^+) = e(t)/Z - V_0/Z$$

4.3. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA RESISTENCIA

Considérese una resistencia concentrada R conectada entre dos nudos (k) y (m) cualquiera, tal como se indica en la figura 4.3.

La corriente a través de la resistencia se la puede hallar de una manera simple, en función de las tensiones en ambos extremos de la rama a la cual pertenece, aplicando Kirchhoff, se tiene:

$$i_{km}(t) = 1/R \{e_k(t) - e_m(t)\} \quad (4.15)$$

4.4. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA INDUCTANCIA

Supongamos que tenemos una inductancia concentrada L' , conectada entre los nodos (k) y (m) , tal como lo muestra en la figura 4.4, la corriente y la tensión en la inductancia están relacionadas por la ecuación diferencial:

$$e_k(t) - e_m(t) = L' \cdot d/dt \{i_{km}(t)\} \quad (4.16)$$

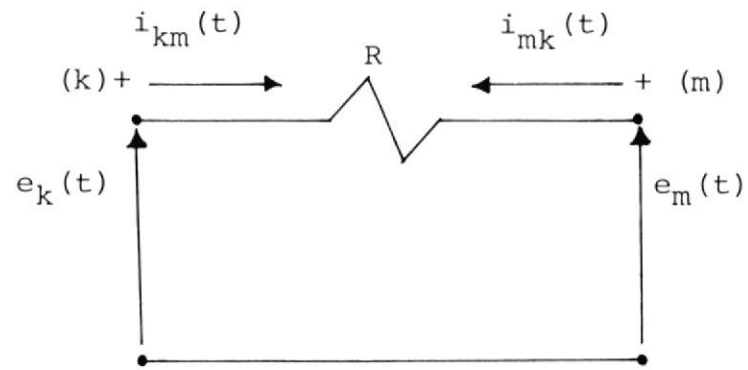


FIGURA 4.3. **C**IRCUITO EQUIVALENTE DE UNA RESISTENCIA

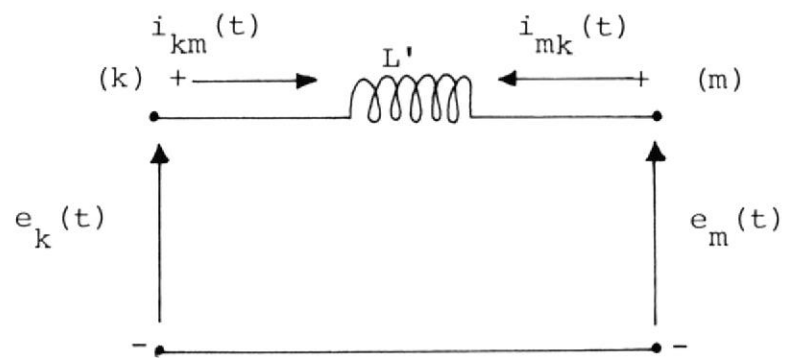


FIGURA 4.4. INDUCTANCIA CONCENTRA L' .

De la ecuación (4.16), podemos despejar la corriente a través de la inductancia, obtenemos por integración:

$$i_{km}(t) = 1/L' \int_{-\infty}^t \{ e_k(t) - e_m(t) \} dt \quad (4.17)$$

De acuerdo a la ecuación (4.17), podemos escribir:

$$i_{km}(t-\Delta t) = 1/L' \int_{-\infty}^{t-\Delta t} \{ e_k(t) - e_m(t) \} dt \quad (4.18)$$

Entonces la ecuación (4.17), puede ser escrita de la siguiente manera:

$$i_{km}(t) = i_{km}(t-\Delta t) + 1/L' \int_{t-\Delta t}^t \{ e_k(t) - e_m(t) \} dt \quad (4.19)$$

Para resolver la ecuación (4.19), usamos la regla trapezoidal de integración, la cual se ilustra en la figura 4.5.

En esa figura se observa que aproximadamente:

$$\int_{t-\Delta t}^t Y(t).dt = \text{Area rayada}$$

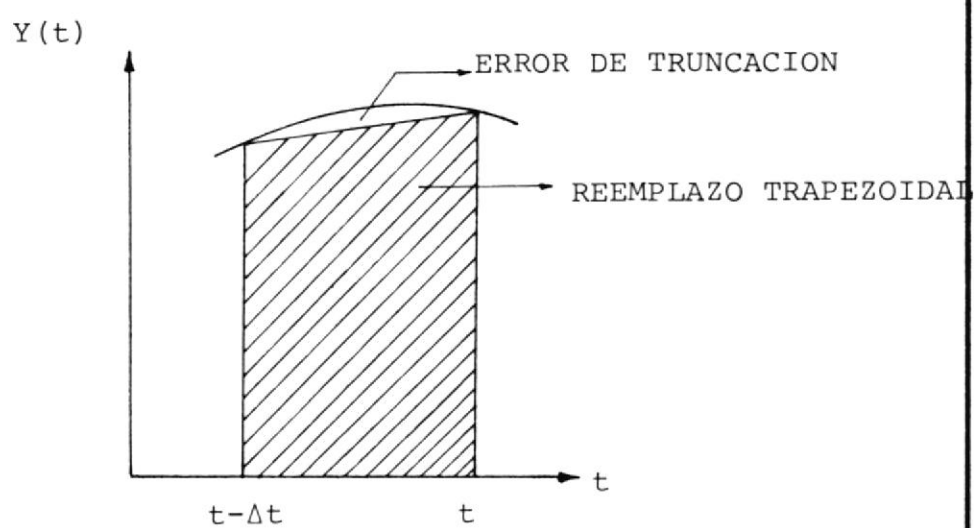


FIGURA 4.5. REGLA TRAPEZOIDAL DE INTEGRACION

Es decir:

$$\int_{t-\Delta t}^t Y(t) \cdot dt = \Delta t / 2 \{ Y(t) + Y(t-\Delta t) \}$$

Es evidente que al realizar el reemplazo trapezoidal existe un error de truncación, pero mientras menor sea el intervalo de integración Δt , menor será dicho error.

Aplicando la regla trapezoidal de integración a la ecuación (4.19), nos queda:

$$i_{km}(t) = i_{km}(t-\Delta t) + \Delta t / 2L' \{ e_k(t) - e_m(t) + e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \} \quad (4.20)$$

Haciendo:

$$I_{km}(t-\Delta t) = i_{km}(t-\Delta t) + \Delta t / 2L' \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \} \quad (4.21)$$

Nos queda:

$$i_{km}(t) = \Delta t / 2L' \{ e_k(t) - e_m(t) \} + I_{km}(t-\Delta t) \quad (4.22)$$

A partir de la ecuación (4.22), podemos obtener el

circuito equivalente para una inductancia concentrada, éste se muestra en la figura 4.6.

La ecuación (4.21), obtenida para evaluar el valor de la fuente de corriente equivalente, no es aplicable directamente durante el período inicial, por este motivo se debe analizar el problema de las condiciones iniciales.

Supongamos que tenemos una inductancia, recorrida por una corriente i_0 , a la cual se le aplica una tensión V entre sus terminales, de acuerdo a la ecuación (4.22) para $t = 0^+$, se tiene:

$$i_{km}(0^+) = \Delta t / 2L' \{e_k(0^+) - e_m(0^+)\} + I_{km}(0^+ - \Delta t)$$

El término $I_{km}(0^+ - \Delta t)$ correspondiente a la fuente de corriente equivalente, no tiene sentido, sin embargo si consideramos que inicialmente la corriente a través de la inductancia no cambia en forma discontinua, entonces es posible calcular el valor que debe tener la fuente de corriente equivalente durante el periodo inicial, para ser empleado en el circuito equivalente. De acuerdo a la asunción anterior:

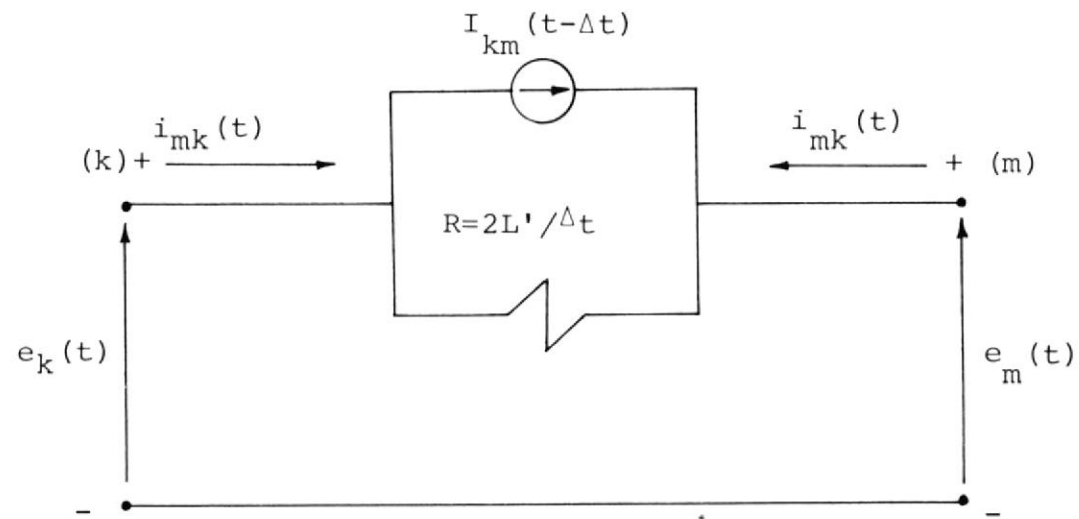


FIGURA 4.6. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA INDUCTANCIA

$$i_{km}(0^-) = i_{km}(0^+) = i_o = \Delta t / 2L' \{e_k(0^+) - e_m(0^+)\} \\ + I_{km}(\text{inicial})$$

pero:

$$e_k(0^+) - e_m(0^+) = v$$

por lo tanto:

$$i_o = \Delta t / 2L' \cdot v + I_{km}(\text{inicial})$$

$$I_{km}(\text{inicial}) = i_o - \Delta t / 2L' \cdot v \quad (4.23)$$

Con ésto el circuito equivalente de la figura 4.6, sigue siendo válido durante el periodo inicial, pero la fuente de corriente equivalente debe ser evaluada empleando la ecuación (4.23).

4.5. ECUACIONES RECURSIVAS Y CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA CAPACITANCIA

Para una capacitancia concentrada C' , conectada entre los nodos (k) y (m), tal como se indica en la

figura 4.7, la corriente que circula a través de ella estaría dada por:

$$i_{km}(t) = C' \frac{d}{dt} \{e_c(t)\} = C' \frac{d}{dt} \{e_k(t) - e_m(t)\} \quad (4.24)$$

Partiendo de la ecuación (4.24), podemos obtener el voltaje a través del capacitor por integración, esto es:

$$e_c(t) = e_k(t) - e_m(t) = 1/C' \int_{-\infty}^t i_{km}(t) \cdot dt \quad (4.25)$$

Al igual que para el caso de la inductancia, se define el estado anterior en una capacitancia como:

$$e_c(t-\Delta t) = e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) = 1/C' \int_{-\infty}^{t-\Delta t} i_{km}(t) \cdot dt \quad (4.26)$$

De las ecuaciones (4.25) y (4.26), podemos escribir:

$$e_k(t) - e_m(t) = e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) + 1/C' \int_{t-\Delta t}^t i_{km}(t) \cdot dt \quad (4.27)$$

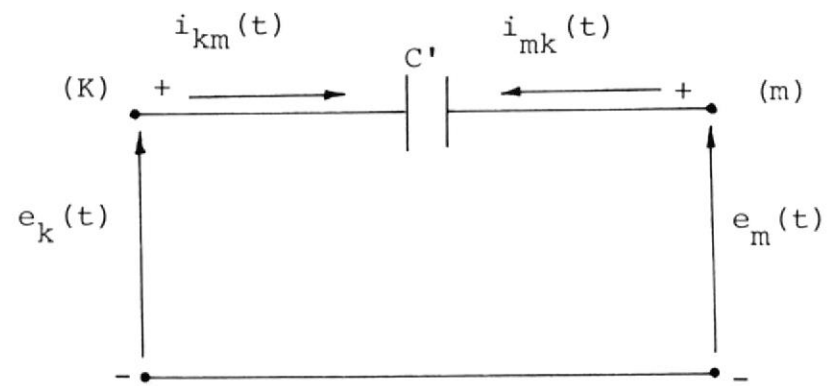


FIGURA 4.7. CAPACITANCIA CONCENTRADA C' .

Aplicando a la ecuación (4.27), la regla trapezoidal de integración, explicada anteriormente, en el intervalo $\{(t-\Delta t), t\}$, se obtiene:

$$e_k(t) - e_m(t) = e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) + \Delta t / 2C' \{i_{km}(t) + i_{km}(t-\Delta t)\} \quad (4.28)$$

Despejando $i_{km}(t)$ de la ecuación (4.28), tenemos:

$$i_{km}(t) = 2C' / \Delta t \{e_k(t) - e_m(t)\} - 2C' / \Delta t \{e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t)\} - i_{km}(t-\Delta t)$$

Definiendo:

$$I_{km}(t-\Delta t) = -2C' / \Delta t \{e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t)\} - i_{km}(t-\Delta t) \quad (4.29)$$

Obtenemos:

$$i_{km}(t) = 2C' / \Delta t \{e_k(t) - e_m(t)\} + I_{km}(t-\Delta t) \quad (4.30)$$

De la ecuación (4.30), podemos concluir que el circuito equivalente para una capacitancia conectada entre los nodos (k) y (m), tendrá una forma similar a aquél que se encontró para una inductancia; tal

como se muestra en la figura 4.8.

Para considerar la condición inicial de una capacidad y emplear el circuito equivalente dado anteriormente, es necesario hacer consideraciones similares que para el caso de la inductancia.

Si al tiempo $t = 0$ se conecta una fuente de corriente I entre los terminales de una capacidad que tiene una tensión inicial V_0 , aceptando que no ocurren cambios bruscos de voltaje a través de la capacidad, durante el periodo inicial se tendrá:

$$e_c(0^-) = e_c(0^+) = V_0$$

De la ecuación (4.30), la tensión a través de la capacidad está dada por:

$$e_c(t) = e_k(t) - e_m(t) = \Delta t / 2C' \{ i_{km}(t) - I_{km}(t - \Delta t) \} \quad (4.31)$$

Evaluando la ecuación (4.31), para $t = 0^+$, se tendría:

$$e_c(0^+) = \Delta t / 2C' \{ i_{km}(0^+) - I_{km}(\text{inicial}) \}$$

pero:

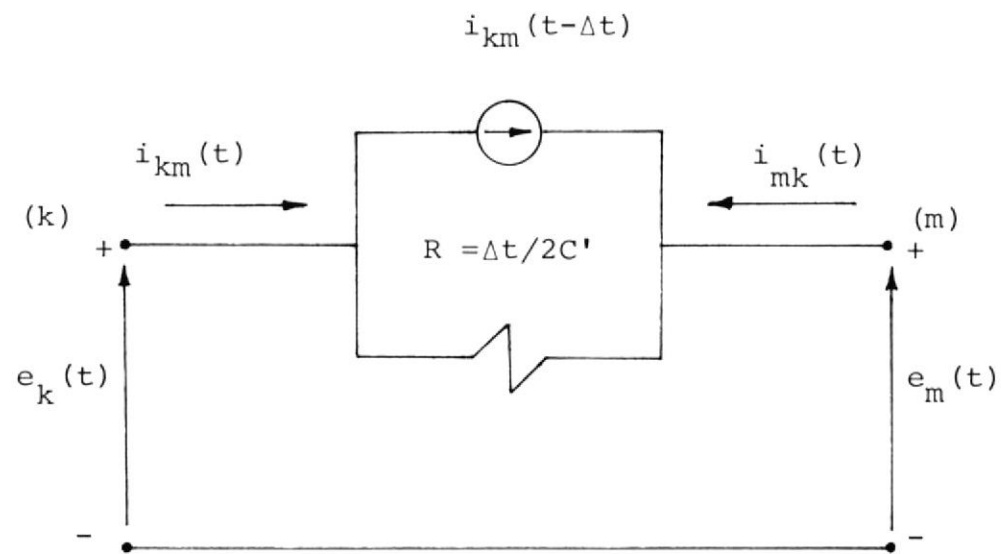


FIGURA 4.8. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UNA CAPACITANCIA CONCENTRADA C'

$$e_c(0^+) = v_o$$

$$i_{km}(0^+) = I$$

Luego:

$$v_o = \Delta t / 2C' \{I - I_{km}(\text{inicial})\}$$

$$I_{km}(\text{inicial}) = I - 2C' / \Delta t \cdot v_o \quad (4.32)$$

En el instante inicial el valor de la fuente de corriente equivalente para una capacitancia debe evaluarse usando la ecuación (4.32), en lugar de la ecuación (4.29).

4.6. DESARROLLO DE UN ALGORITMO COMPUTACIONAL

En método anteriormente descrito puede ser usado - para resolver cualquier red lineal monofásica, que consista de los siguientes cuatro tipos de ramas:

Elementos Concentrados:

- a. Resistencia R
- b. Inductancia L'
- c. Capacitancia C'

Elementos distribuidos:

- d. Líneas sin pérdidas (con inductancia L y capacitancia C , por unidad de longitud).

La configuración de la figura 4.9, se usará a manera de ilustración, ésta contiene los cuatro tipos de ramas mencionados anteriormente y puede ser parte de una red mayor.

Supongamos que los voltajes y corrientes instantáneos se han calculado a intervalos de tiempo Δt hasta el instante $t - \Delta t$ y deben ser ahora calculados para un tiempo t , la suma de las corrientes que dejan el nodo 1, a través de las ramas a él conectadas, debe ser igual a la corriente inyectada i_1 , esto es:

$$i_{12}(t) + i_{13}(t) + i_{14}(t) + i_{15}(t) = i_1(t) \quad (4.33)$$

Se usarán ecuaciones nodales, por esta razón las corrientes de rama de la ecuación (4.33) deben ser expresadas en función de los voltajes de nodo.

Para la rama 1-2, de acuerdo a la ecuación (4.14), se tiene:

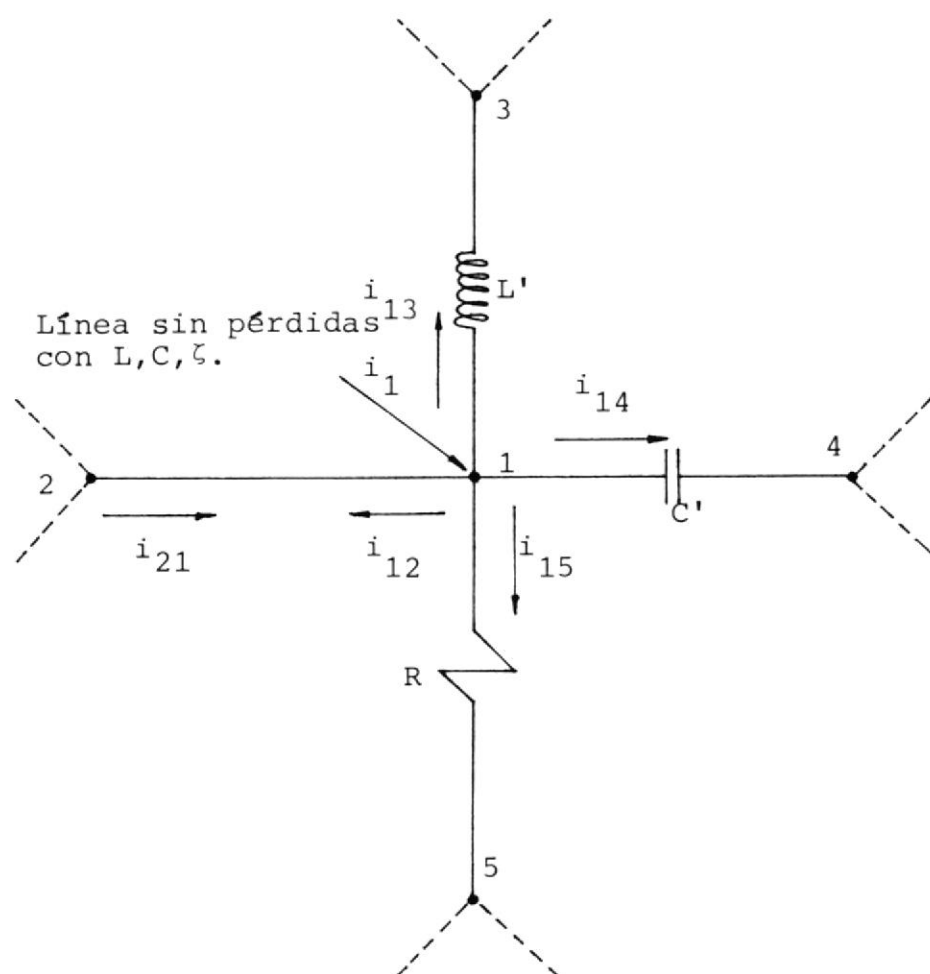


FIGURA 4.9. RED MONOFASICA QUE INCLUYE LOS CUATRO TIPOS DE RAMAS CONSIDERADOS.

$$i_{12}(t) = e_1(t)/Z + I_{12}(t - \zeta) \quad (4.34)$$

donde:

$$I_{12}(t-\zeta) = - \{ e_2(t-\zeta)/Z + i_{21}(t-\zeta) \} \quad (4.35)$$

Para la rama 1-3, de acuerdo a la ecuación (4.22), se tiene:

$$i_{13}(t) = \Delta t/2L' \{ e_1(t) - e_3(t) \} + I_{13}(t-\Delta t) \quad (4.36)$$

Donde:

$$I_{13}(t - \Delta t) = i_{13}(t-\Delta t) + \Delta t/2L' \{ e_1(t-\Delta t) - e_3(t-\Delta t) \} \quad (4.37)$$

Para la rama 1-4, de acuerdo a la ecuación (4.30), se tiene:

$$i_{14}(t) = 2C'/\Delta t \{ e_1(t) - e_4(t) \} + I_{14}(t-\Delta t) \quad (4.38)$$

donde:

$$I_{14}(t-\Delta t) = -i_{14}(t-\Delta t) - 2C'/\Delta t \{ e_1(t-\Delta t) - e_4(t-\Delta t) \} \quad (4.39)$$

Finalmente, para la rama 1-5, de acuerdo a la ecuación (4.15), se tiene:

$$i_{15}(t) = 1/R \{ e_1(t) - e_5(t) \} \quad (4.40)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.34), (4.36), (4.38), (4.40), en la ecuación (4.33), se obtiene la ecuación nodal para el nodo 1:

$$\begin{aligned} & \{1/Z + \Delta t/2L' + 2C'/\Delta t + 1/R\} e_1(t) - \Delta t/2L' e_3(t) \\ & - 2C'/\Delta t e_4(t) - 1/R e_5(t) = i_1(t) - \{I_{12}(t-\Delta t) + \\ & I_{13}(t-\Delta t) + I_{14}(t-\Delta t)\} \end{aligned}$$

Si consideramos un sistema monofásico cualquiera de n nodos, formado por una combinación arbitraria de líneas y elementos concentrados, trabajando con el circuito equivalente para cada uno de los elementos, dados anteriormente, es posible obtener una red equivalente del sistema de equilibrio de cada elemento; se puede formar un sistema de n ecuaciones nodales que permite obtener las tensiones en todos los nodos del sistema eléctrico de potencia. Usando notación matricial, el sistema de ecuaciones lineales tiene la forma siguiente:

$$\{Y\} \{e(t)\} = \{i(t)\} - \{I\} \quad (4.41)$$

Donde:

$\{Y\}$ = matriz de conductancias nodales.

$\{e(t)\}$ = matriz columna de los n voltajes de nodo al tiempo t .

$\{i(t)\}$ = matriz columna de las n corrientes inyectadas en los nodos al tiempo t .

$\{I\}$ = matriz columna formada por las fuentes de corriente equivalentes de los elementos, que pueden determinarse de la "historia pasada".

Debemos observar que, puesto que la matriz $\{Y\}$ depende del intervalo Δt , de los esquemas equivalentes de las inductancias y capacidades, ésta permanecerá con coeficientes constantes mientras no se altere el intervalo Δt ; es por lo tanto preferible, aunque no indispensable, el trabajar con un intervalo de integración Δt constante.

La matriz $\{Y\}$ es real y simétrica puesto que la

red es puramente resistiva cuando se trabaja con - los circuitos equivalentes anteriormente expuestos, su formación sigue las mismas reglas conocidas para la formación de la matriz admitancia de nodos - en el análisis de estado estable, es decir:

Y_{ii} = suma de las conductancias de todas las ramas conectadas al nodo i .

$Y_{ik} = Y_{ki}$ = negativo de la suma de las conductancias de todas las ramas conectadas entre el no do i y el nodo k .

En la ecuación (4.41), parte de los voltajes serán conocidos (excitación especificada) y otros serán - desconocidos, dividiendo los nodos en dos grupos, el grupo A de los nodos con voltajes desconocidos y el grupo B de los nodos con voltajes conocidos.

Sea $(m+n)$ el número de nodos del sistema bajo es tudio, se supone conocida la tensión en m nodos y nos interesa determinar la tensión en los n nodos restantes, realizando la partición de la matriz - $\{Y\}$, nos queda:

$$\begin{bmatrix} \{Y_{AA}\} & \{Y_{AB}\} \\ \{Y_{BA}\} & \{Y_{BB}\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{e_A(t)\} \\ \{e_B(t)\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{i_A(t)\} \\ \{i_B(t)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{I_A\} \\ \{I_B\} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Despejando las incógnitas, se tiene:

$$\{Y_{AA}\} \{e_A(t)\} = \{I_{total}\} - \{Y_{AB}\} \{e_B(t)\} \quad (4.43)$$

donde:

$$\{I_{total}\} = \{i_A(t)\} - \{I_A\}$$

$$\{Y_{AA}\} = \text{submatriz de conductancias, } (n \times n)$$

$$\{e_A(t)\} = \text{vector de tensiones en nodos por determinar, } (n \times 1).$$

$$\{i_A(t)\} = \text{vector de corrientes inyectadas, } (n \times 1).$$

$$\{I_A\} = \text{vector de fuentes equivalentes, } (n \times 1).$$

$$\{Y_{AB}\} = \text{submatriz de conductancias, } (n \times m).$$

$$\{e_B(t)\} = \text{vector de tensiones conocidas, } (m \times 1)$$

Calculando el lado derecho del sistema (4.43) en cada

iteración, se pueden obtener las tensiones en todos los nodos del sistema eléctrico de potencia resolviendo un sistema lineal de ecuaciones.

La ecuación (4.43), puede resolverse realizando triangularización factorial en las matrices aumentadas $\{Y_{AA}\}$ $\{Y_{AB}\}$ una vez; el mismo proceso es extendido luego al vector $\{I_{total}\}$ en cada intervalo de tiempo, en la llamada sustitución hacia adelante, seguida por una sustitución hacia atrás para obtener $\{e_A(t)\}$, como se ilustra en la figura 4.10. Solamente unos pocos elementos en las matrices $\{Y_{AA}\}$ $\{Y_{AB}\}$ son diferentes de cero, esta dispersión puede explotarse almacenando tan sólo aquellos elementos diferentes de cero de la matriz triangularizada. El ahorro en tiempo de computadora y en los requerimientos de almacenamiento puede ser optimizado con un esquema de eliminación ordenada.

Cuando los nodos están conectados exclusivamente a través de líneas sin pérdidas y elementos concentrados R, L', C' entre nodos y tierra, entonces la matriz $\{Y_{AA}\}$ resulta ser una matriz diagonal, en este caso las ecuaciones pueden ser resueltas por separado, algunos programas se basan en ésta topología restringida.

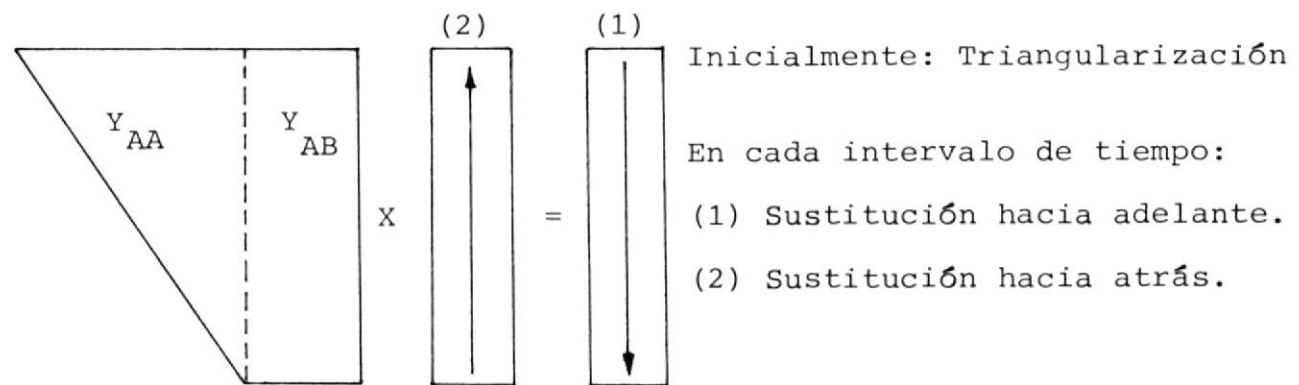


FIGURA 4.10. SOLUCIONES REPETIDAS PARA LAS ECUACIONES LINEALES

La construcción del vector $\{I_{total}\}$ es principalmente un problema de organización. Las corrientes de nodo dadas son entradas en $\{i_A(t)\}$ y los voltajes de nodo dados en $\{e_B(t)\}$, los valores pueden ser leídos punto a punto o pueden ser calculados con funciones estandarizadas (curva seno, onda rectangular, etc.), existen casos en los cuales la excitación puede ser solamente de voltajes ($\{i_A(t)\} = 0$). Las descargas atmosféricas son mejor representadas por fuentes de corriente. La "historia pasada" se entra en el vector $\{I_A\}$. Las fuentes de corriente I , constituyen la "historia pasada", conocida de los intervalos precedentes, éstas tienen que ser almacenadas y actualizadas constantemente, puesto que se necesitan para construir el vector $\{I_{total}\}$. Para cada inductancia y capacitancia, un sólo valor $I_{km}(t-\Delta t)$ debe ser almacenado, para cada línea sin pérdidas, una lista doble, I_{km} e I_{mk} , debe ser grabada para los tiempos $t-\Delta t, t-2\Delta t, \dots, t-\zeta$.

En la actualización de I_{km} para inductancias, es más rápido usar la ecuación recursiva:

$$I_{km}(t-\Delta t) = I_{km}(t-2\Delta t) + 2.x \quad (4.44)$$

Donde:

$$x = \Delta t / 2L' \{ e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) \}$$

La fórmula (4.44) puede verificarse de la siguiente manera; para una inductancia:

$$I_{km}(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \Delta t / 2L' \{ e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) \}$$

$$i_{km}(t) = \Delta t / 2L' \{ e_k(t) - e_m(t) \} + I_{km}(t - \Delta t)$$

Entonces podemos escribir:

$$i_{km}(t - \Delta t) = \Delta t / 2L' \{ e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) \} + I_{km}(t - 2\Delta t)$$

Reemplazando:

$$I_{km}(t - \Delta t) = \Delta t / 2L' \{ e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) \} + I_{km}(t - 2\Delta t) + \Delta t / 2L' \{ e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) \}$$

Por lo tanto:

$$I_{km}(t - \Delta t) = I_{km}(t - 2\Delta t) + \Delta t / L' \{ e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) \}$$

En el caso de una capacitancia, para actualizar I_{km} , es más rápido usar la fórmula recursiva:

$$I_{km}(t-\Delta t) = -I_{km}(t-2\Delta t) - 2.X \quad (4.45)$$

donde:

$$X = 2C'/\Delta t \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \}$$

La ecuación (4.45) puede verificarse de la siguiente manera; para una capacitancia:

$$I_{km}(t-\Delta t) = -i_{km}(t-\Delta t) - 2C'/\Delta t \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \}$$

$$i_{km}(t) = 2C'/\Delta t \{ e_k(t) - e_m(t) \} + I_{km}(t-\Delta t)$$

De donde:

$$i_{km}(t-\Delta t) = 2C'/\Delta t \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \} + I_{km}(t-2\Delta t)$$

Reemplazando se tiene:

$$I_{km}(t-\Delta t) = -2C'/\Delta t \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \} - I_{km}(t-2\Delta t) \\ - 2C'/\Delta t \{ e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t) \}$$

por lo tanto :

$$I_{km}(t-\Delta t) = -I_{km}(t-2\Delta t) - 4C'/\Delta t \{e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t)\}$$

Para resolver el sistema de ecuaciones lineales, en el presente trabajo se usa el método de eliminación de Gauss, un diagrama de bloques que permite visualizar la secuencia de pasos a seguir para la solución del problema, se ilustra en la figura 4.11.

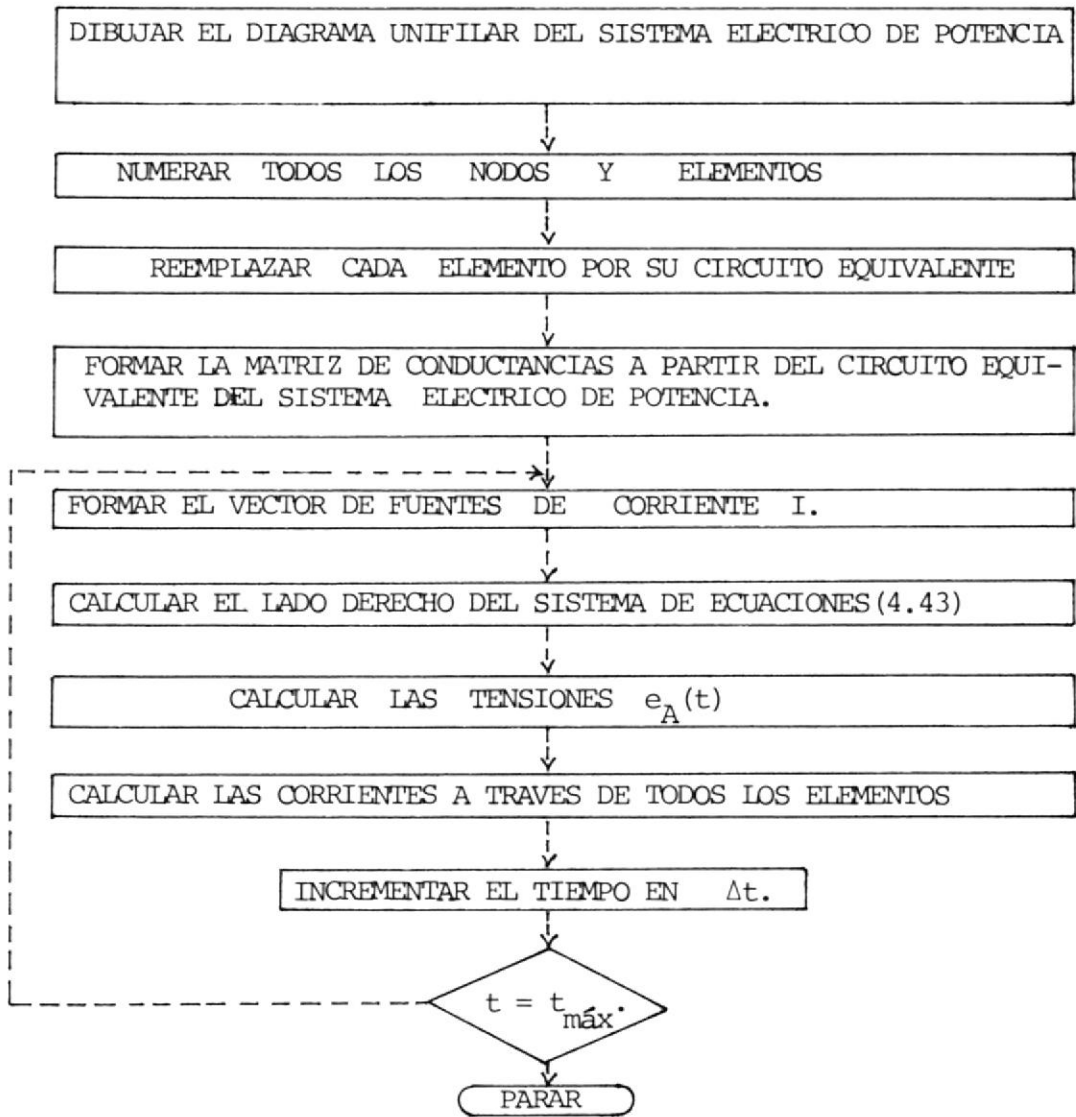


FIGURA 4.11. DIAGRAMA DE BLOQUES

CAPITULO V

DESARROLLO DE PROGRAMAS DE COMPUTACION PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EN REDES MONOFASICAS USANDO EL METODO DE BERGERON

5.1. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROGRAMA DESARROLLADO

El programa de computación para el cálculo de sobretensiones transitorias que se describe a continuación, fue desarrollado en base al método de Bergerón de acuerdo a las bases teóricas establecidas en el Capítulo anterior. Está escrito en lenguaje FORTRAN IV y fue procesado en el computador IBM-Sistema 34 del Centro de Computación de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Las características generales que presenta el programa son:

- Las líneas de transmisión (monofásicas) se consideran ideales.

Las líneas con pérdidas se pueden tratar en forma

aproximada, según se explica en el Apéndice B: Líneas con Pérdidas y Eliminación de Nodos Intermedios.

- No se consideran los efectos de distorsión y parámetros dependientes de la frecuencia.
- Los sistemas a estudiarse pueden contener parámetros concentrados R,L y C.
- Se pueden simular diversos tipos de perturbación en el sistema eléctrico de potencia, como energización de sistemas en vacío o caída de un rayo - sobre una línea de transmisión.
- El programa desarrollado permite determinar las tensiones en los nodos y las corrientes a través de los elementos como funciones discretas del tiempo, durante el período en estudio.
- Es posible obtener el gráfico de voltaje (o corriente) Vs. tiempo de algunas de las variables de interés.

5.2. DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa de computación, aplicable a redes monofásicas, permite resolver problemas de sobretensiones transitorias en un sistema eléctrico de potencia cuyo circuito equivalente puede contener hasta 20 nodos y 50 elementos.

Los arreglos de las variables que son funciones del tiempo, fueron dimensionados para permitir que el tiempo de tránsito sea de 30 intervalos de integración como máximo; sin embargo, esto puede ser modificado cambiando las declaraciones COMMON involucradas.

El programa está formado por 784 declaraciones FORTRAN, de las cuales 238 corresponden al programa fuente o programa principal y el resto se distribuye entre 7 subprogramas que realizan funciones específicas, ocupa 64 Kbytes de memoria central y dos archivos de disco.

5.2.1. Programa Fuente

El programa principal está estructurado de modo que, luego de las instrucciones de es

pecificación y de limpiar algunos de los arreglos usados, se realiza la lectura de todos los datos necesarios para el procesamiento de un estudio, no es posible realizar más de un estudio durante el mismo proceso. La lectura e impresión de los datos de entrada así como ciertos cálculos pequeños pero esenciales se realizan por medio de dos subprogramas denominados SUBROUTINE LEA1 y SUBROUTINE LEA2. Posteriormente se forma la matriz de admitancias del sistema, usando para ello el subprograma denominado SUBROUTINE MATADM.

El programa admite la existencia de voltajes o corrientes de entrada, pero no de los dos al mismo tiempo, si existen voltajes de entrada se hace necesario realizar la partición de la matriz de admitancias del sistema (YN), según se aprecia en las ecuaciones matriciales 4.42 y 4.43, para esto se usa el subprograma denominado SUBROUTINE PARMAT.

Una vez que se hace cero la variable tiempo, las señales de perturbación se generan por medio de la SUBROUTINE ONDAS y comienza el

proceso "paso a paso" que básicamente consiste en formar el lado derecho del sistema de ecuaciones 4.43, empleando las ecuaciones recursivas para evaluar el vector de fuentes de corrientes equivalentes y realizando las operaciones matriciales. Cuando se completa la construcción de éste vector, se resuelve el sistema de ecuaciones utilizando la SUBROUTINE GAUSS, mediante la cual se determinan las tensiones en todos los no dos del sistema bajo estudio. Determinadas las tensiones en todos los nodos, se obtienen las corrientes a través de todos los - elementos del sistema equivalente y se imprí men aquellas variables que son requeridas - por los datos de entrada al programa, las variables que han sido escogidas, en los da tos de entrada, para ser graficadas se alma cenan en un archivo de disco, al igual que la variable tiempo, posteriormente se in crementa el tiempo en un intervalo de integra- ción (Δt), se generan las señales de pertur- bación y el proceso iterativo se repite has ta que se completa el tiempo total de cálcu- lo asignado al estudio.

Cuando ésto sucede los datos almacenados en los archivos, correspondientes a las variables a graficarse, se transfieren a la memoria central y mediante la SUBROUTINE PLOT , se obtienen los gráficos requeridos, con lo cual termina la ejecución del programa.

5.2.2. Subprogramas

Según se mencionó anteriormente, el programa hace uso de 7 subprogramas, uno de los cuales es utilizado en el proceso sólo en el caso de que existan voltajes de entrada al sistema. A continuación se describe en forma muy breve la función que desempeña - cada uno de estos subprogramas.

- a. SUBROUTINE LEA1. Este subprograma luego de limpiar algunos de los arreglos usados, realiza la lectura del número y clase de elementos del sistema así como de los diferentes intervalos de tiempo a usarse durante la ejecución del programa. En base a los datos de las líneas de transmisión y elementos concen-

trados efectúa el cálculo de la admitancia y determina el tiempo de tránsito de cada elemento del sistema equivalente. Finalmente realiza la impresión de títulos, datos de entrada y datos calculados.

- b. SUBROUTINE LEA2. Por medio de este subprograma se realiza la lectura e impresión de los datos necesarios para la generación de las señales de perturbación (voltajes o corrientes) que son aplicadas al sistema. Además, lee e imprime la información acerca de las variables que van a imprimirse o graficarse como variables de salida.

- c. SUBROUTINE MATADM. La función de este subprograma es la de construir la matriz de admitancias del sistema equivalente (YN), a partir de los datos ingresados a la SUBROUTINE LEA1. El algoritmo considera la admitancia, nodo inicial y nodo final de cada elemento. Puesto que el intervalo Δt se considera constante para cada estudio y como el programa actual no admite cambios en la topología de la red, la matriz de ad

mitancias no experimenta cambio alguno durante el proceso.

d. SUBROUTINE PARMAT. Según se mencionó anteriormente, en el caso de que existan voltajes aplicados al sistema se hace necesario realizar la partición de la matriz de admittancias. Una vez que se ha detectado la existencia de voltajes aplicados al sistema, se transfiere el control a este subprograma cuya función es la de generar las submatrices Y_{AA} y Y_{AB} necesarias para la formación de la ecuación 4.43, que permitirá determinar los voltajes de nodo del sistema.

e. SUBROUTINE ONDAS. Genera las señales de perturbación; mediante este subprograma se puede disponer de varias formas de onda, haciendo el estudio de sobretensiones en un sistema ante diferentes causas. Para identificar cada forma de onda se emplea una clave que se ingresa al programa entre los datos de entrada y es leída por la SUBROUTINE LEA2. En este caso se han incorpora-

do cinco funciones: escalón, rampa, exponencial, seno y coseno trigonométrico. Mediante la función exponencial es posible obtener una gran variedad de formas de onda usando la ecuación:

$$e = E \{ \exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t) \}$$

Los parámetros E , α_1 y α_2 dependen del tiempo de frente, tiempo de cola y valor pico de la onda que se quiere generar. La manera de determinar estos parámetros se detalla en el Apéndice C: Ecuación Empírica para la Aproximación de Formas de Onda.

- f. SUBROUTINE GAUSS. Se utiliza para resolver un sistema de ecuaciones lineales, quedando así determinadas las tensiones en todos los nodos del sistema eléctrico de potencia. Como su nombre lo indica, se hace uso del método de eliminación de Gauss, pero puede utilizarse cualquier otro método que resuelva un sistema de ecuaciones de este tipo.

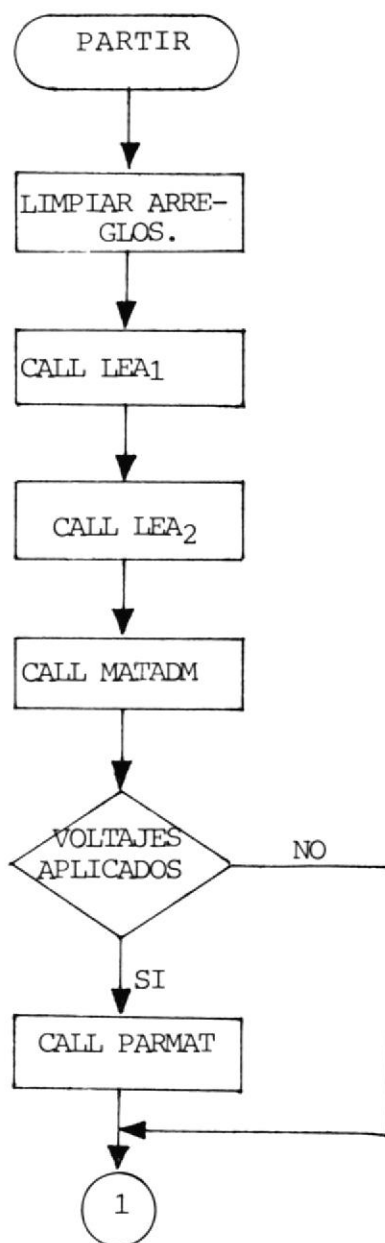
- g. SUBROUTINE PLOT. Grafica las variables de salida seleccionadas en los datos de entrada que son leídos por la SUBROUTINE LEA2. Este subprograma gráfica hasta 200 puntos por cada variable de salida como máximo.

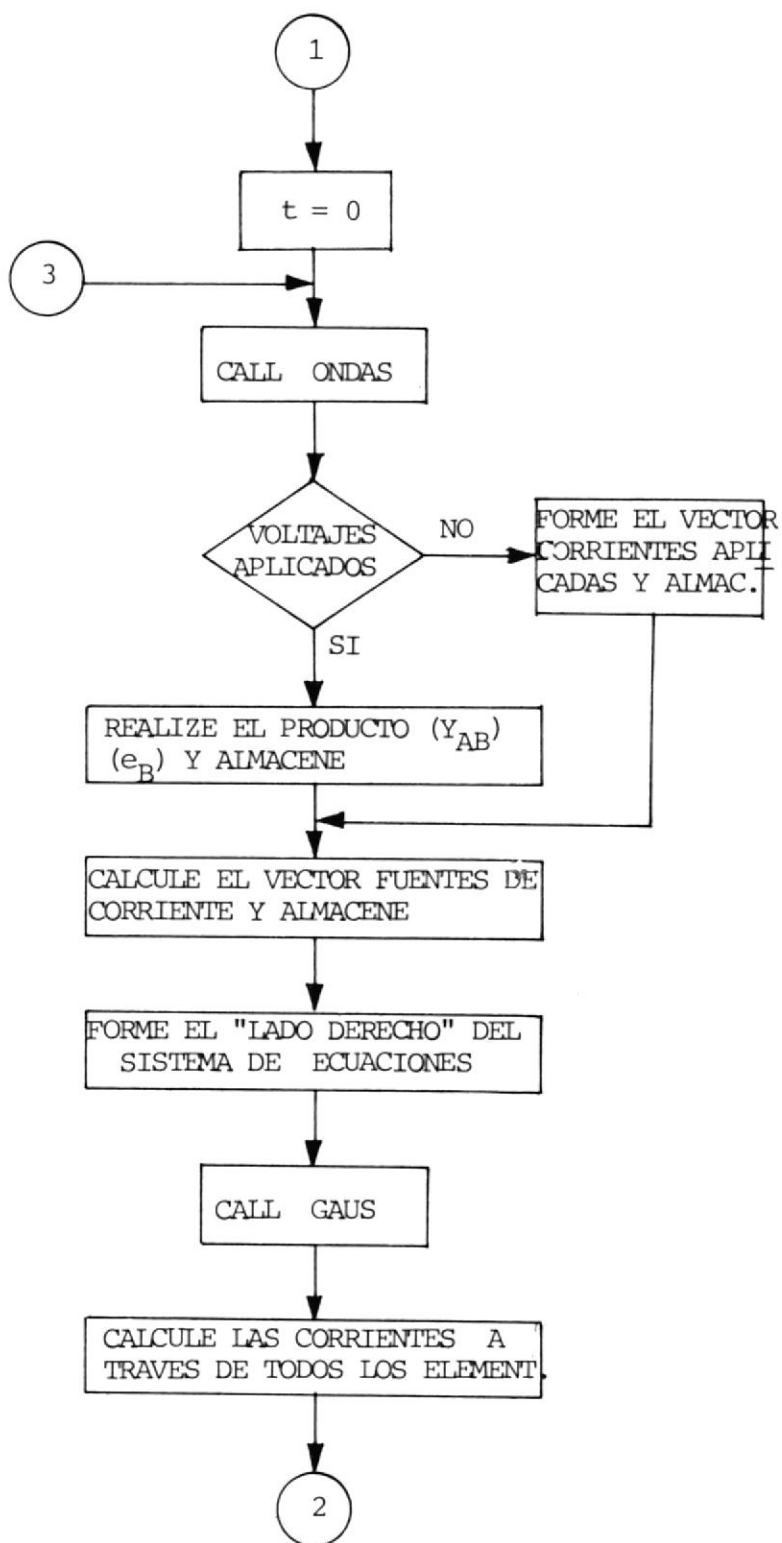
5.2.3. Diagramas de Flujo

Se incluyen a continuación, los diagramas de flujo del programa principal y de las subrutinas utilizadas.

Por razones prácticas y tratando de dejar clara la secuencia de cálculo en cada caso, se han confeccionado diagramas muy simplificados los que, además de las ecuaciones correspondientes deducidas en el Capítulo IV, pueden servir como guía para reproducir y mejorar los programas ya descritos.

DIAGRAMA DE FLUJO PROGRAMA FUENTE





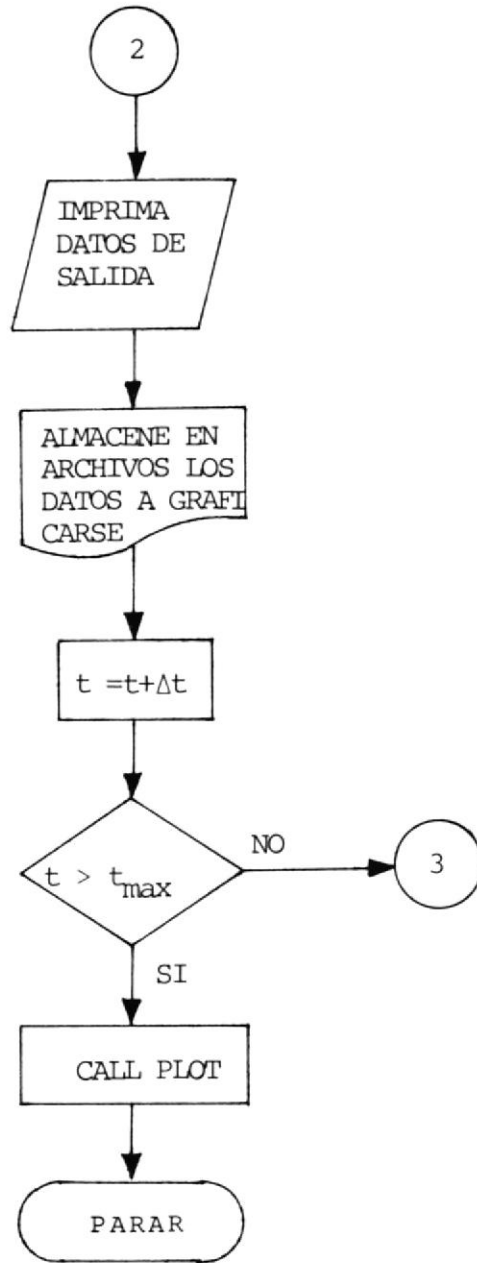
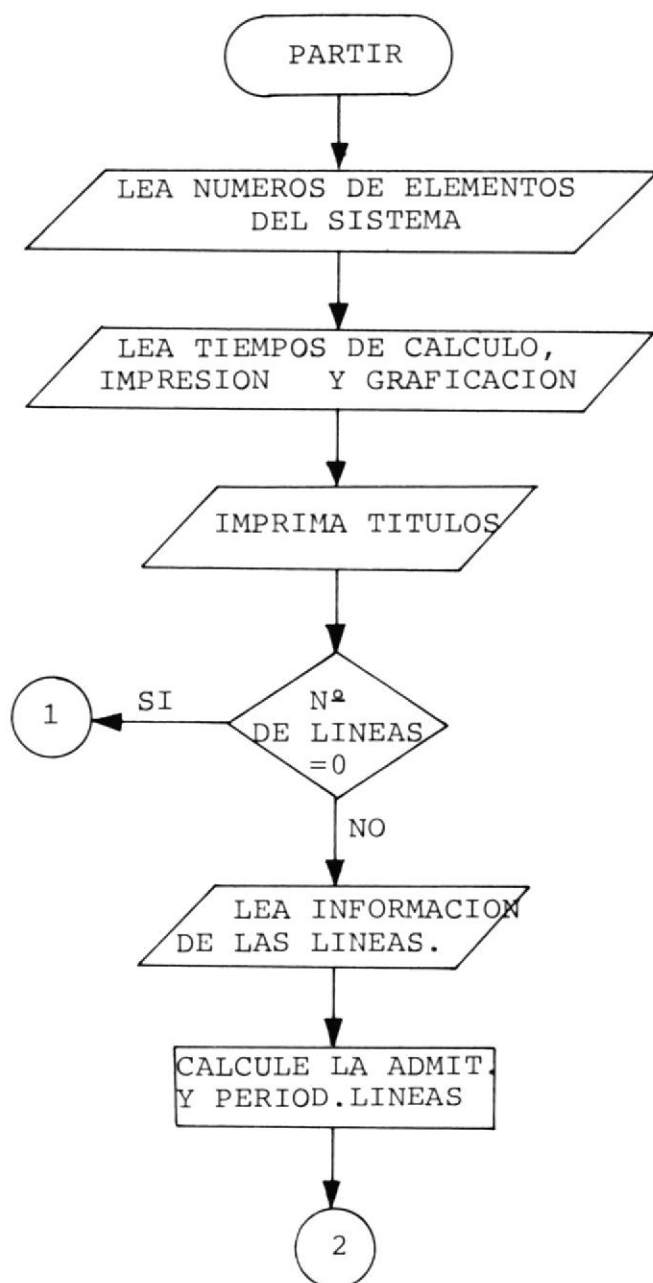
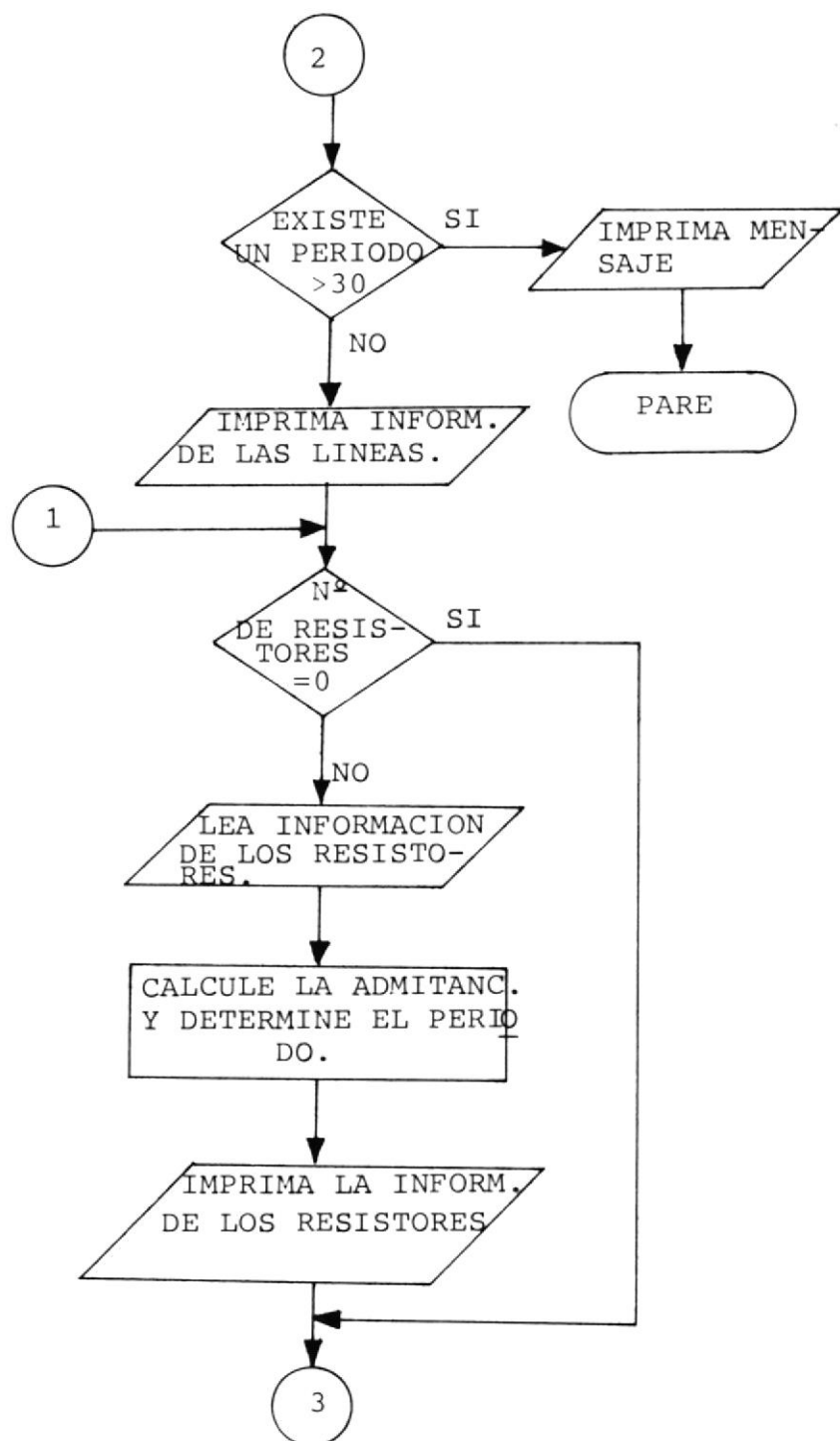
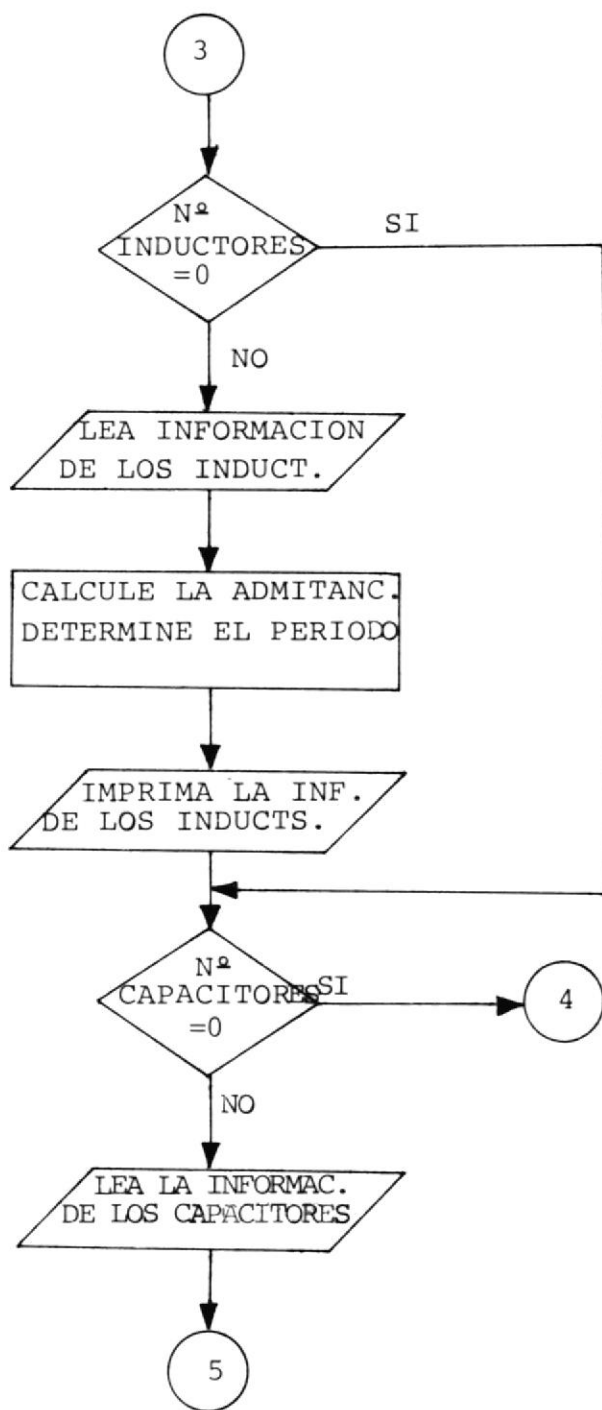


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE LEA 1







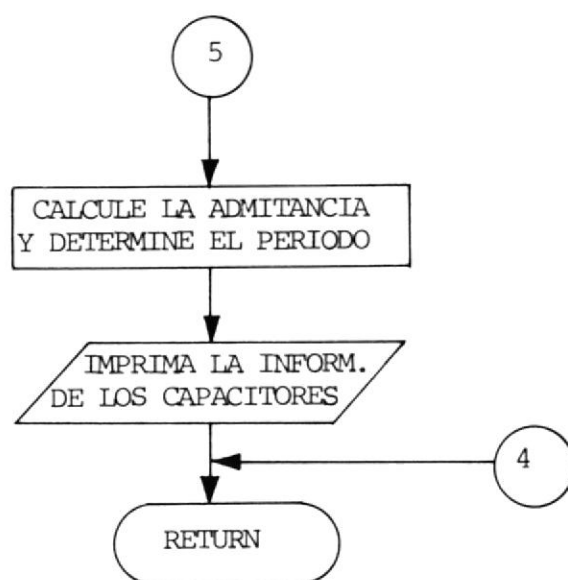


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE LEA 2

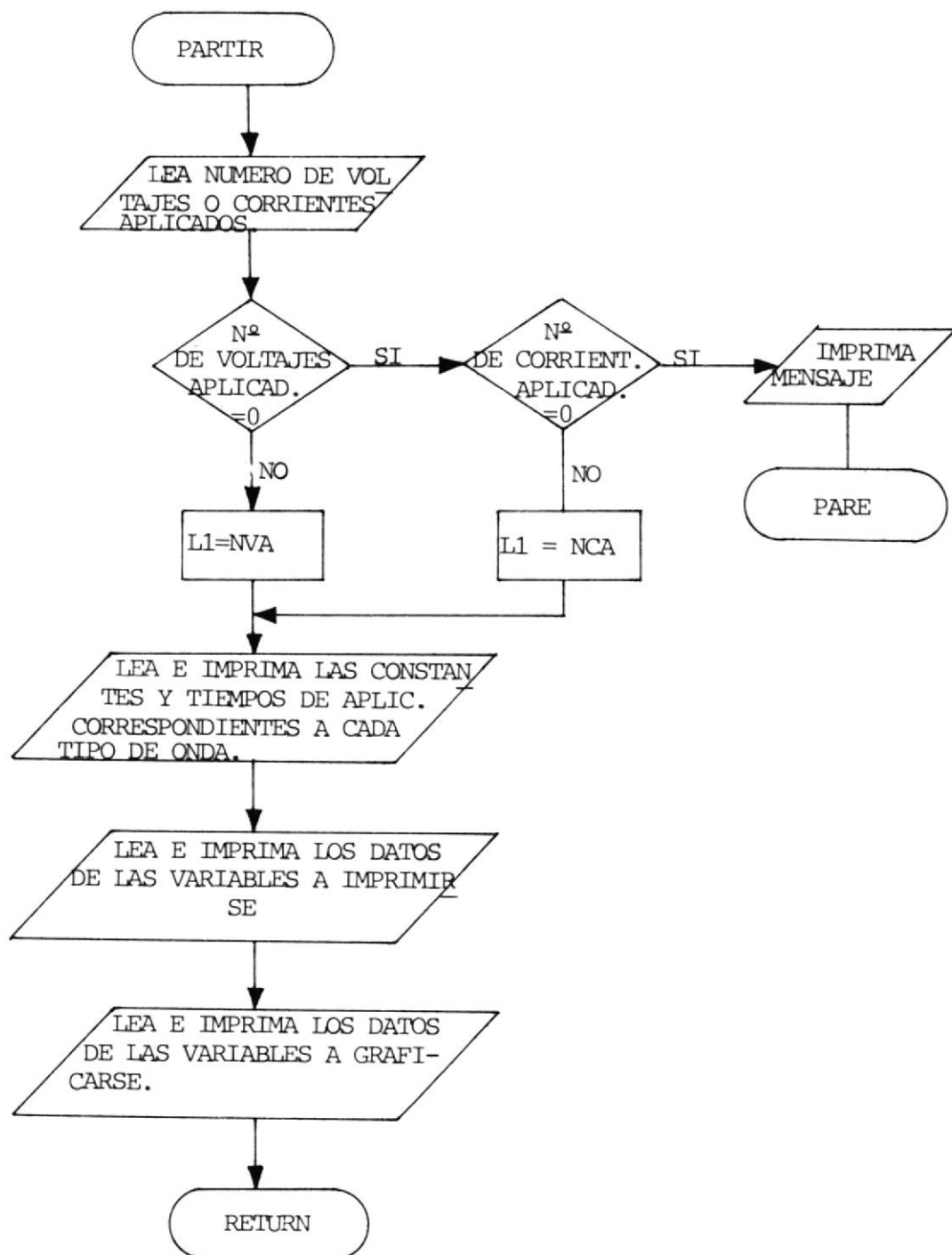
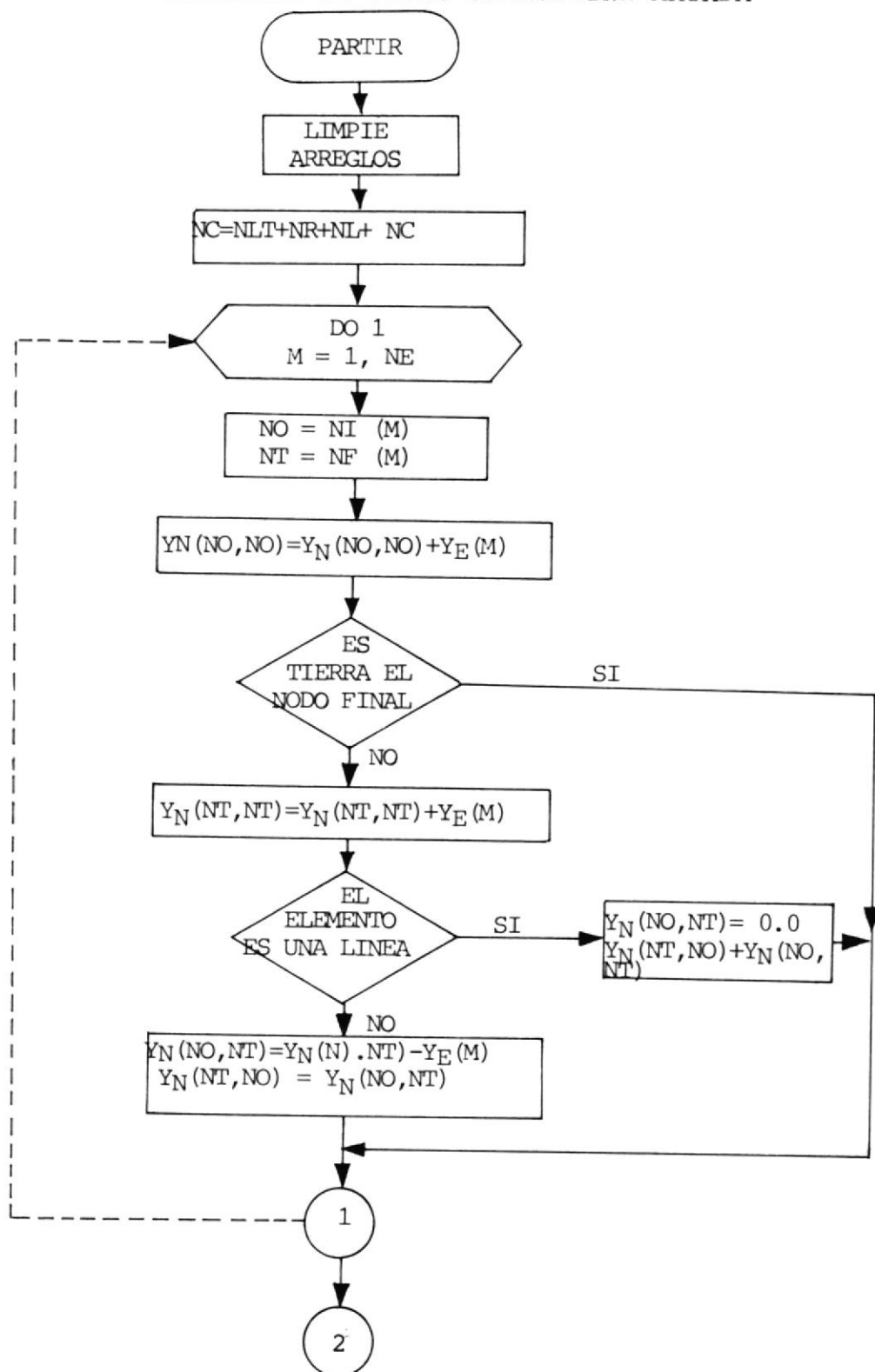


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE MATADM



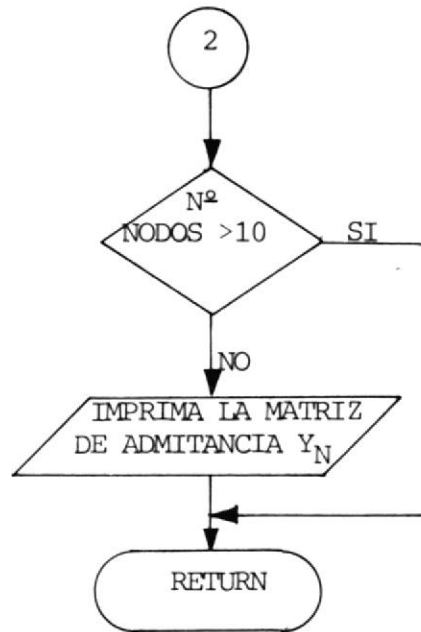


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE PARMAT

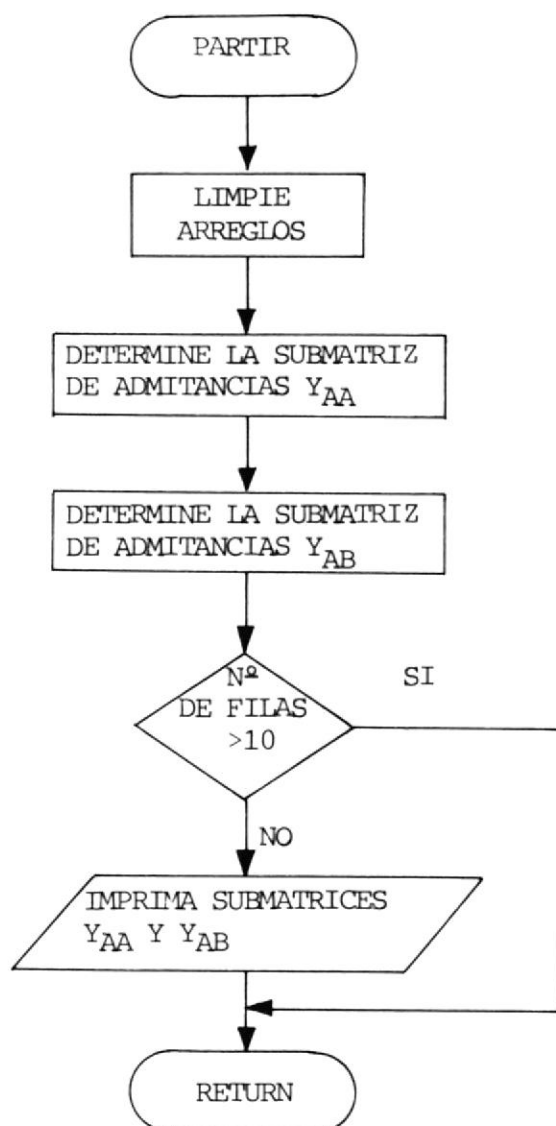


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE ONDAS

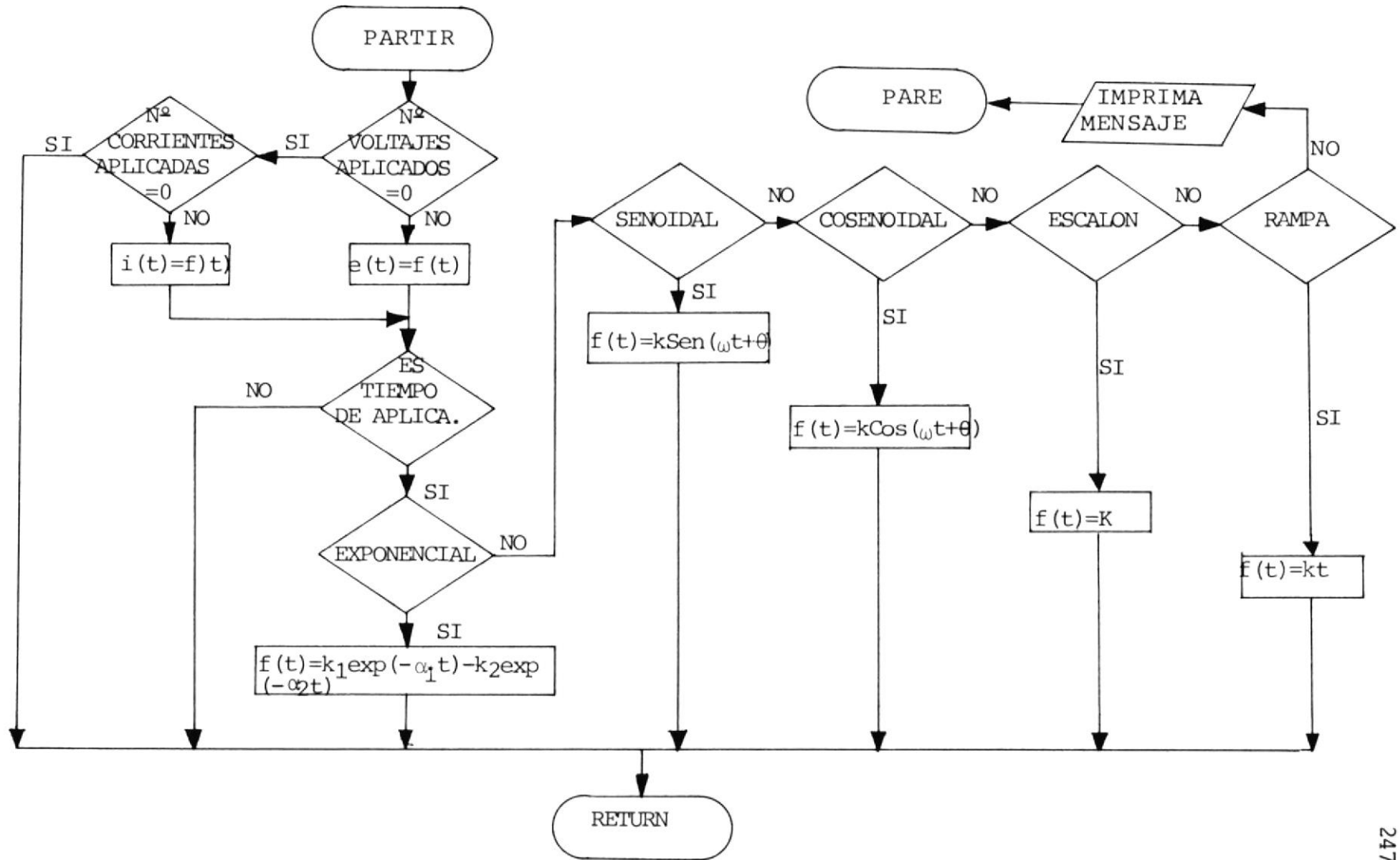


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE GAUSS

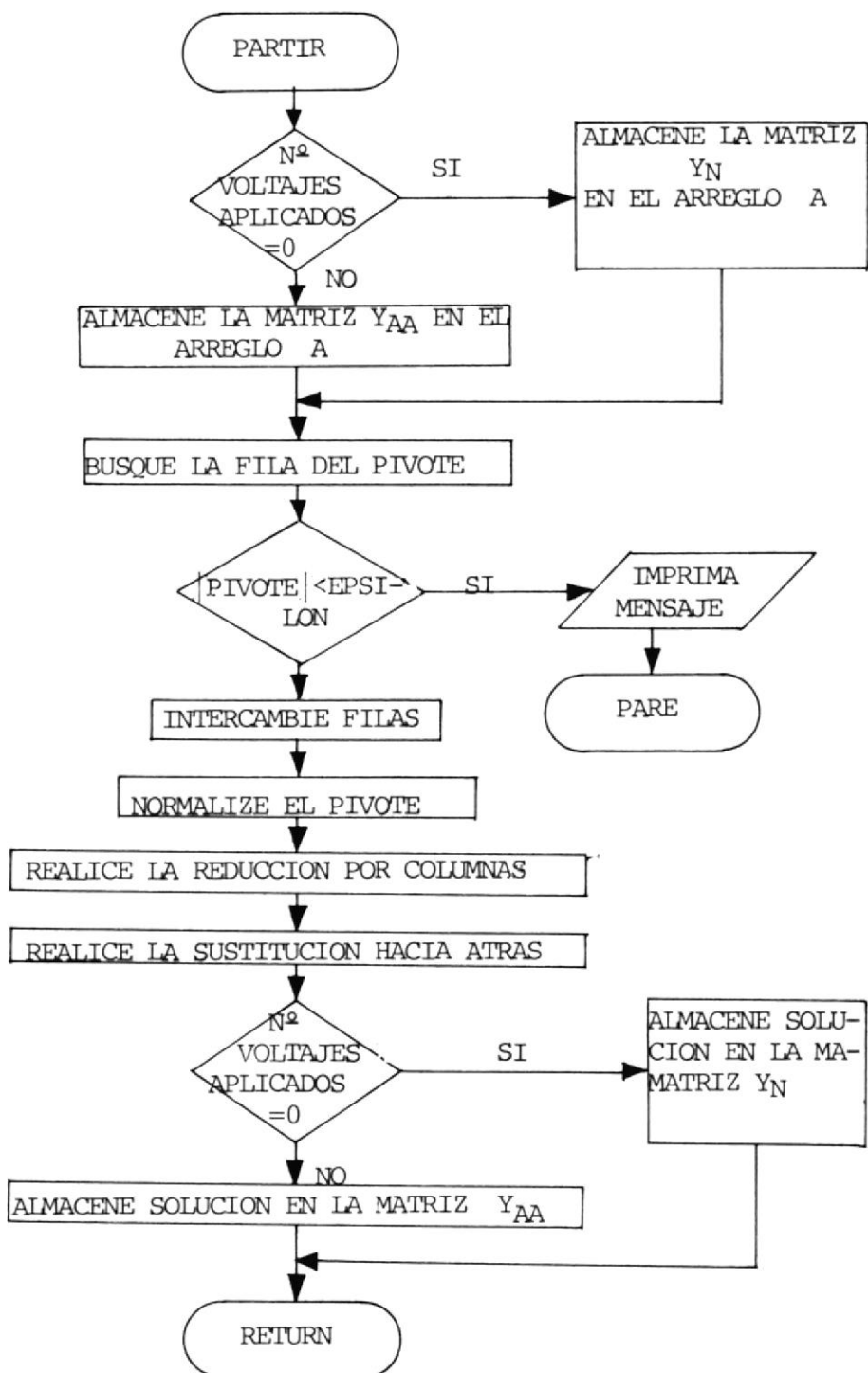
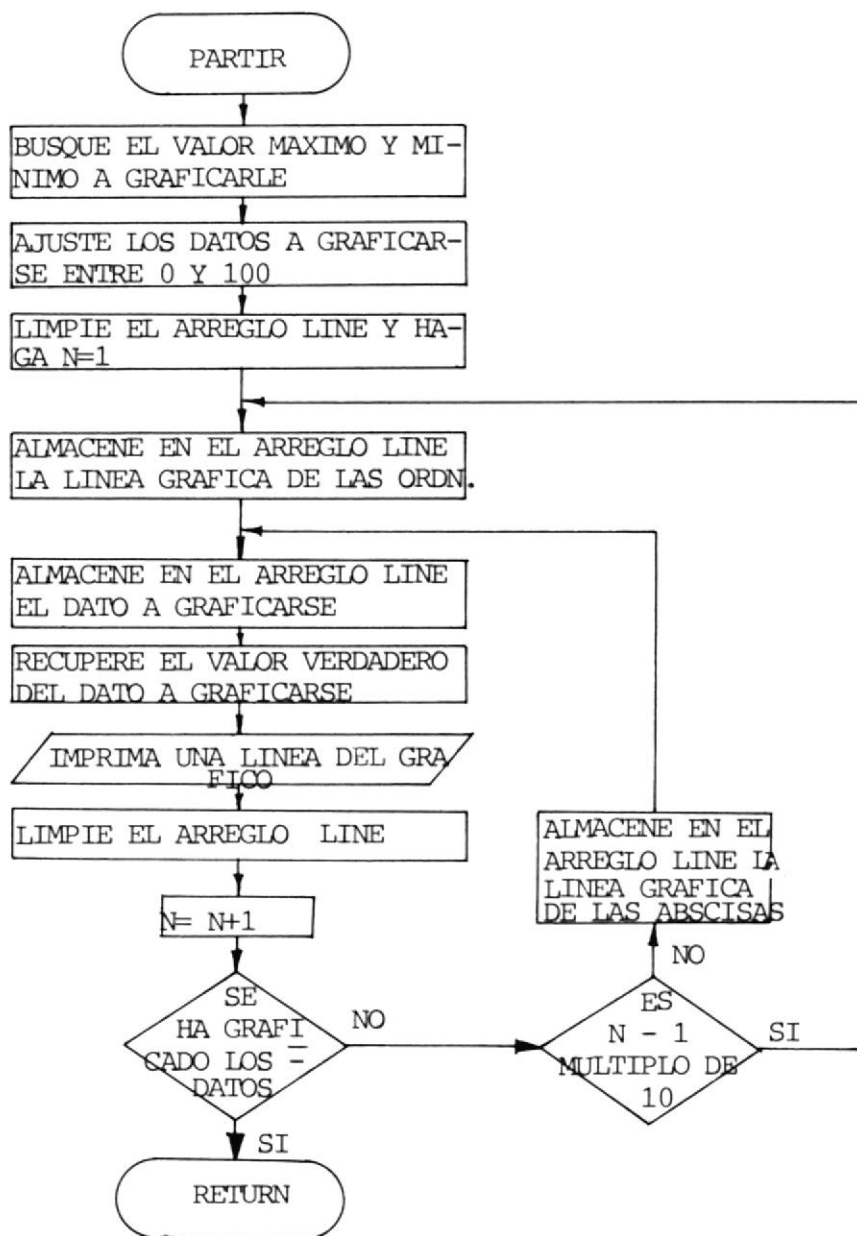


DIAGRAMA DE FLUJO SUBROUTINE PLOT



5.2.4. Listado de Programas

A continuación se dan los listados generales de los programas desarrollados con el objeto de completar la información que acerca de ellos se ha resumido en los diagramas de flujo anteriormente expuestos.

BERGE

T150

DATE 83/012510

T1

```

C *****
C *
C * PROGRAMA PARA EL CALCULO DE SOBRETENSIONES EMPLEANDO EL *
C * METODO DE BERGERON *
C *
C *****

```

PROGRAM BERGE

```

C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD, TIPO, RE, C
C COMMON NN, NLT, NR, NL, NC, DELTAT, FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG
C COMMON NI(100), NE(100), TIPO(100), PERIOD(100), YE(100)
C COMMON FK1(5), FK2(5), FK3(5), ALFA1(5), ALFA2(5), FREQ(5), PHASE(5)
C COMMON TIA(5), TEA(5), NA(5), CLASE(5), NVI(9), NICI(9), NFCI(9), NVG(5)
C COMMON NICG(5), NFCG(5), NVA, NCA, NVIMP, NCIMP, NVGRAF, NCGRAF
C COMMON VOLTN(21,30), CA(20), YN(20,21), YAA(15,16), YAB(15,5)
C COMMON T, ITL, ITC, ITD, RI(100,30), FI(100,30), Y(200), TIME(200)
C COMMON AST(20), KG
C DIMENSION VCIMP(9), IUB(15), VCGRAF(10), X(10), JN(131), JB(9)
C DEFINE FILE 15(200,10,U,I1), 16(200,1,U,I2)
C DATA LT, RE, L, C/'LT', 'R', 'L', 'C' /, ASTE, MJN, MJB/'****', '-', ' ' /

```

```

C ***LIMPIAR ARREGLOS***

```

```

C
C KG=30
C DO 1 K=1,20
C 1 AST(K)=ASTE
C DO 2 K=1,20
C CA(K)=0.0
C DO 3 K1=1,KG
C VOLTN(K,K1)=0.0
C 3 CONTINUE
C 2 CONTINUE
C DO 4 K=1,100
C DO 4 K1=1,KG
C RI(K,K1)=0.0
C FI(K,K1)=0.0
C 4 CONTINUE
C DO 201 K=1,131
C 201 JN(K)=MJN
C DO 202 K=1,9
C 202 JB(K)=MJB

```

```

C ***LECTURA E IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA***

```

```

C CALL LEA1
C CALL LEA2
C NE=NLT+NR+NL+NC
C KC=2*NE
C IK=NN-NVA

```

```

C ***CALCULE E IMPRIMA LA MATRIZ ADMITANCIA DEL SISTEMA***

```

```

C CALL MATADM

```

```

C ***REALIZE LA PARTICION DE LA MATRIZ ADMITANCIA E IMPRIMA***

```

```

C IF(NVA.EQ.0) GO TO 87
C CALL PARMAT

```

```

C ***EFECTUE LA EXTENCION DE LOS ARREGLOS***

```

```

C
C 87 DO 88 K=1,NL
C K1=NE+K
C NI(K1)=NE(K)
C NF(K1)=NI(K)
C TIPO(K1)=TIPO(K)
C YE(K1)=YE(K)
C PERIOD(K1)=PERIOD(K)
C 88 CONTINUE

```

```

C
C   ***FORMAR 'LADO DERECHO' DEL SISTEMA DE ECUACIONES***
C
  IF (NVIMP.EQ.0.AND.NCIMP.EQ.0) GO TO 200
  WRITE(3,126) -(AST(K),K=1,8),(AST(K1),K1=9,16)
126  FORMAT(1H1,8A4,'***/' *CORRIENTES Y/O VOLTAJES DE SALIDA*/1H ,B
14,'***'//)
  K1=NVIMP+NCIMP
  K2=(K1+1)*13+1
  WRITE(3,127) (JN(K),K=1,K2)
127  FORMAT(1H ,131A1)
  WRITE(3,129) (JB(K),K=1,K1)
128  FORMAT(1H ,'| TIEMPO |',A1,'COLUMNA 2 |',A1,'COLUMNA 3 |',A
1,'COLUMNA 4 |',A1,'COLUMNA 5 |',A1,'COLUMNA 6 |',A1,'COLUMNA 7
2 |',A1,'COLUMNA 8 |',A1,'COLUMNA 9 |',A1,'COLUMNA 10 |')
  WRITE(3,127) (JN(K),K=1,K2)
200  DO 116 K=1,KG
115  VOLTIN(21,K)=0.0
  FIND(15*1)
  FIND(16*1)
  I=0.0
  ITL=1
  ITC=0
  NF1=0
132  ITD=ITL-KG*(ITL/KG)
  IF (ITD.EQ.0) ITD=KG
C
C   ***GENERE ONDAS DE EXCITACION***
C
  CALL ONDAS
  IF (NVA.EQ.0) GO TO 96
  K2=1
  DO 91 K=1,NN
  DO 92 K1= 1,NVA
  IF (NA(K1).EQ.K) GO TO 93
  92  CONTINUE
  GO TO 91
  93  IUB(K2)=K
  K2=K2+1

  91  CONTINUE
  DO 94 IF=1,IK
  DO 95 IC=1,NVA
  M=IUB(IC)
  YAA(IF,IK+1)=YAA(IF,IK+1)-YAB(IF,IC)*VOLTIN(M,ITD)
  95  CONTINUE
  94  CONTINUE
  GO TO 98
  96  DO 97 IF=1,NN
  97  YN(IF,NN+1)=YN(IF,NN+1)+CA(IF)
C
C   ***CALCULE EL VECTOR FUENTES DE CORRIENTE***
C
  98  DO 99 K=1,KC
  M=NI(K)
  N=NF(K)
  KP=ITC-PERIOD(K)
  IF (KP.LT.0) GO TO 99
  ITD1=KP-KG*(KP/KG)+1
  IF (TIPO(K).EQ.RE) GO TO 99
  IF (TIPO(K).EQ.LI) GO TO 100
  IF (TIPO(K).EQ.L) GO TO 101
  IF (TIPO(K).EQ.C) GO TO 102
  GO TO 99
100  DO 103 K2=1,KC
  IF (NI(K2).NE.N) GO TO 103
  IF (NF(K2).NE.M) GO TO 103
  F1(K,ITD1)=-Yc(K)*VOLTIN(N,ITD1)-RI(K2,ITD1)
103  CONTINUE
  GO TO 99
101  F1(K,ITD1)=YE(K)*{VOLTIN(M,ITD1)-VOLTIN(N,ITD1)}+RI(K,ITD1)
  GO TO 99
102  F1(K,ITD1)=-Yc(K)*{VOLTIN(M,ITD1)-VOLTIN(N,ITD1)}-RI(K,ITD1)
  99  CONTINUE
  IF (NVA.NE.0) GO TO 106

```

```

DO 104 K=1,NN
DO 105 K2=1,KC
IF(NI(K2).NE.K) GO TO 105
KP=ITC-PERIOD(K2)
ITD1=KP-KG*(KP/KG)+1
IF(KP.LT.0) ITD1=1
YN(K,NN+1)=YN(K,NN+1)-FI(K2,ITD1)
105 CONTINUE
104 CONTINUE
GO TO 111
106 K2=1
DO 107 K=1,NN
DO 108 K3=1,NVA
IF(NA(K3).EQ.K) GO TO 107
108 CONTINUE
IUB(K2)=K
K2=K2+1
107 CONTINUE
DO 109 K=1,IK
DO 110 K2=1,KC
IF(NI(K2).NE.IUB(K)) GO TO 110
KP=ITC-PERIOD(K2)
ITD1=KP-KG*(KP/KG)+1
IF(KP.LT.0) ITD1=1
YAA(K,IK+1)=YAA(K,IK+1)-FI(K2,ITD1)
110 CONTINUE
109 CONTINUE
C
C   ***RESUELVA EL SISTEMA DE ECUACIONES***
C
111 CALL GAUSS
IF(NVA.EQ.0) GO TO 113
DO 112 K=1,IK
M=IUB(K)
VOLTN(M,ITD)=YAA(K,IK+1)
112 YAA(K,IK+1)=0.0
GO TO 115
113 DO 114 K=1,NN
VOLTN(K,ITD)=YN(K,NN+1)
114 YN(K,NN+1)=0.0
C
C   ***CALCULÉ LAS CORRIENTES A TRAVES DE TODOS LOS ELEMENTOS***
C
115 DO 117 K=1,KC
M=NI(K)
N=NF(K)
KP=IIC-PERIOD(K)
ITD1=KP-KG*(KP/KG)+1
IF(KP.LT.0) ITD1=1
IF(TIPO(K).EQ.LT) GO TO 118
IF(TIPO(K).EQ.RE) GO TO 119
IF(TIPO(K).EQ.L.OR.TIPO(K).EQ.C) GO TO 120
GO TO 117
118 RI(K,ITD)=YE(K)*VOLTN(M,ITD)+FI(K,ITD1)
GO TO 117
119 RI(K,ITD)=YE(K)*(VOLTN(M,ITD)-VOLTN(N,ITD))
GO TO 117
120 RI(K,ITD)=YE(K)*(VOLTN(M,ITD)-VOLTN(N,ITD))+FI(K,ITD1)
117 CONTINUE
C
C   ***IMPRIMA DATOS DE SALIDA***
C
IF(III.GI.T.OR.TEI.LT.T) GO TO 130
IF(NVIMP.EQ.0) GO TO 122
DO 121 K=1,NVIMP
M=NVI(K)
VCIMP(K)=VOLTN(M,ITD)
121 CONTINUE
122 IF(NCIMP.EQ.0) GO TO 130
DO 123 K=1,NCIMP
M=NICI(K)
N=NFICI(K)
DO 124 K1=1,KC

```

```

      IF(NI(K1).EQ.M.AND.NF(K1).EQ.N) GO TO 125
124 CONTINUE
125 K2=NVIMP+K
      VCIMP(K2)=RI(K1,ITD)
123 CONTINUE
      DO 126 IF(NVIMP=-9.0.AND.NCIMP.EQ.0) GO TO 130
      K2=NVIMP+NCIMP
      WRITE(3,129) T,(VCIMP(K),K=1,K2)
129 FORMAT(' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3
1, ' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ',E10.3,' | ')
      TII=TII+TIMP
C
C      ***ALMACENE DATOS A GRAFICARSE***
C
130 IF(TIG.GT.T.DR.TFG.LT.T) GO TO 138
      IF(NVGRAF.EQ.0) GO TO 133
      DO 131 K=1,NVGRAF
      M=NVG(K)
131 VCGRAF(K)=VDLTN(M,ITD)
133 IF(NCGRAF.EQ.0) GO TO 137
      DO 134 K=1,NCGRAF
      M=NICG(K)
      N=NFCG(K)
      DO 135 K1=1,KC
      IF(NI(K1).EQ.M.AND.NF(K1).EQ.N) GO TO 136
135 CONTINUE
136 K2=NVGRAF+K
      VCGRAF(K2)=RI(K1,ITD)
134 CONTINUE
137 IF(NVGRAF.EQ.0.AND.NCGRAF.EQ.0) GO TO 138
      K2=NVGRAF+NCGRAF
      WRITE(15'I1) (VCGRAF(K),K=1,K2)
      WRITE(16'I2) T
      NF1=NF1+1
      TIG=TIG+TGRAF
C
C      ***INCREMENTE VARIABLES DE TIEMPO***
C
138 T=T+DELTAT
      ITL=ITL+1
      ITC=ITC+1
      IF(T.GT.FINALT) GO TO 139
      GO TO 132
C
C      ***GRAFIQUE VARIABLES DE SALIDA***
C
139 K2=(NVIMP+NCIMP+1)*13+1
      WRITE(3,127) (JN(K),K=1,K2)
      IF(NVGRAF.EQ.0.AND.NCGRAF.EQ.0) GO TO 146
      DO 140 K=1,NF1
140 READ(15'K) TIME(K)
      IF(NVGRAF.EQ.0) GO TO 147
      DO 141 K=1,NVGRAF
      DO 142 KI=1,NF1
      READ(15'K1) (X(K2),K2=1,K)
142 Y(K1)=X(K)
      WRITE(3,143) NVG(K)
143 FORMAT(1H1,'GRAFICO VOLTAJE VS TIEMPO',5X,'NODO NO.',I3//1H',5X,
1'TIEMPO',109X,'VOLTAJES')
      FIND(15'I1)
      CALL PLOT(NF1)
141 CONTINUE
147 IF(NCGRAF.EQ.0) GO TO 146
      DO 143 K=1,NCGRAF
      K1=NVGRAF+K
      DO 144 K2=1,NF1
      READ(15'K2) (X(K3),K3=1,K1)
144 Y(K2)=X(K1)
      WRITE(3,145) NICG(K),NFCG(K)
145 FORMAT(1H1,'GRAFICO CORRIENTE VS TIEMPO',5X,'NODO INC.',I3,5X,
1'NODO FINAL=',I3//1H',5X,'TIEMPO',109X,'CORRIENTES')
      FIND(15'I1)
      CALL PLOT(NF1)
243 CONTINUE
146 STOP
      END

```

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA LA LECTURA E IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA *
C *
C *****

```

C SUBROUTINE LEA1

```

C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 S,P,PERIOD,TIPO,RE,C,BLANC
C REAL IND, LONG
C COMMON NN, NLT, NR, NL, NC, DELTAT, FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG
C COMMON NI(100), NF(100), TIPO(100), PERIOD(100), YE(100)
C COMMON FK1(5), FK2(5), FK3(5), ALFA1(5), ALFA2(5), FREQ(5), PHASE(5)
C COMMON TIA(5), TFA(5), NA(5), CLASE(5), NVI(9), NICI(9), NFI(9), NVG(5)
C COMMON NCG(5), NFG(5), NVA, NCA, NVIMP, NCIMP, NVGRAF, NCGRAF
C COMMON VOLT(21,30), CA(20), YN(20,21), YAA(15,16), YAB(15,5)
C COMMON T, ITL, ITC, ITD, RI(100,30), FI(100,30), Y(200), TIME(200)
C COMMON AST(20), KG
C DATA LT, RE, L, C, /'LT', 'R', 'L', 'C' /, BLANC / ' ' /

```

C ***LIMPIAR ARREGLOS***

```

C DO 2 K=1,100
C NI(K)=0
C NF(K)=0
C TIPO(K)=BLANC
C PERIOD(K)=0
C YE(K)=0.0
C 2 CONTINUE

```

C ***LECTURA E IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA***

```

C READ(4,5) NN,NLT,NR,NL,NC
C READ(4,6) DELTAT,FINALT,TGRAF,TIMEP
C READ(4,6) TII,TFI,TIG,TFG
C WRITE(3,20) (AST(K),K=1,15)
C 20 FORMAT(1H1,34X,15A4,'*')
C WRITE(3,8)
C 8 FORMAT(35X,'*',59X,'*/35X,'* CALCULO DE SOBRETENSIONES EMPLEANDO
C 1EL METODO DE BERGERON */35X,'*',59X,'*')
C WRITE(3,9) (AST(K),K=1,15)
C 9 FORMAT(35X,15A4,'*')
C WRITE(3,10)
C 10 FORMAT(1H0/' LAS UNIDADES SON:/' VOLTAJES',9X,'=' VOLTIOS/' CO
C 1RRIENTES',7X,'=' AMPERIOS/' FRECUENCIAS',6X,'=' CICLOS/SEG/' A
C 2NGULOS',10X,'=' GRADOS/' RESISTENCIAS',5X,'=' OHMIOS/' ADMITAN
C 3CIAS',6X,'=' MHOS/' INDUCTANCIAS',5X,'=' MILIHENRIOS/' CAPACIT
C 4ANCIAS',4X,'=' MICROFARADIOS/' TIEMPO',11X,'=' MILLISEGUNDOS/'
C 5LONGITUD',9X,'=' MILLAS/'/)
C WRITE(3,11) (AST(K),K=1,4), (AST(K1),K1=1,4)
C 11 FORMAT(1H ,4A4,'**'/1H ,*DATOS DE ENTRADA*/1H ,4A4,'**/'/)
C WRITE(3,12) NN,NLT,NR,NL,NC
C 12 FORMAT(' NUMERO DE NODOS',12X,'=',15/' NUMERO DE LINEAS',11X,'=',1
C 15/' NUMERO DE RESISTORES',5X,'=',15/' NUMERO DE INDUCTORES',5X
C 2,'=',15/' NUMERO DE CAPACITORES',4X,'=',15/'/)
C WRITE(3,13) DELTAT,TIMEP,TGRAF,TII,TIG,TFI,TFG,FINALT
C 13 FORMAT(' INTERVALO DE INTEGRACION',9X,'=',E10.3/' INTERVALO DE IMP
C 1RESION',11X,'=',E10.3/' INTERVALO DE GRAFICACION',9X,'=',E10.3/' T
C 2IEMPO INICIAL DE IMPRESION',6X,'=',E10.3/' TIEMPO INICIAL DE GRAFI
C 3CACION',4X,'=',E10.3/' TIEMPO FINAL DE IMPRESION',6X,'=',E10.3/' T
C 4IEMPO FINAL DE GRAFICACION',6X,'=',E10.3/' TIEMPO FINAL DE CALCULO
C 5',10X,'=',E10.3/'/)

```

C ***LEA E IMPRIMA INFORMACION DE LAS LINEAS***

```

C IF(NL.LEQ.0) GO TO 18
C WRITE(3,14) (AST(K),K=1,6), (AST(K1),K1=7,12)
C 14 FORMAT(1H ,6A4,'**'/1H ,*INFORMACION DE LAS LINEAS*/1H ,6A4,'**'/
C 1/' LINEA NODO INICIAL NODO FINAL INDUCTANCIA CAPACITAN
C 2NCIA LONGITUD PERIODO ADMITANCIA/'/)
C DO 15 K=1,NLT
C READ(4,7) S,P,IND,CAP, LONG

```

```

Z=SUPT((IND/CAP)*1.0E+3)
IT=LDNG*SUPT(IND*CAP*1.0E-9)*1.0E+3
TP=IT/DELTAT
IP=TP
TP=TP-IP
IF(IP.GE.0.5) IP=IP+1
NI(K)=S
NF(K)=R
PERIOD(K)=IP
IF(PERIOD(K).GT.KG) GO TO 40
YE(K)=1.0/Z
TIPO(K)=LI
WRITE(3,17) K,S,R,IND,CAP,LDNG,PERIOD(K),YE(K)
17 FORMAT(1H ,I3,10X,I2,14X,I2,8X,E10.3,6X,E10.3,5X,E8.2,6X,I2,7X,
1E10.3)
GO TO 15
40 WRITE(3,41) NI(K),NF(K),KG
41 FORMAT(1H1, ' EL PERIODO DE LA LINEA',I4,'-',I4, ' ES MAYOR QUE',
1I3//1H , 'LA EJECUCION HA SIDO CANCELADA')
STOP
15 CONTINUE
C
C ***LEA E IMPRIMA INFORMACION DE LOS ELEMENTOS CONCENTRADOS***
C
C ***LEA E IMPRIMA INFORMACION DE LOS RESISTORES***
C
18 IF(NR.EQ.0) GO TO 29
WRITE(3,25) (AST(K),K=1,7),(AST(K1),K1=8,14)
25 FORMAT(1H0/1X,7A4,'***'/ ' *INFORMACION DE LOS RESISTORES*/1H ,7A4
1,'***'///' RESISTOR',4X,'NODO INICIAL',4X,'NODO FINAL',4X,'RESISTE
2NCIA',4X,'ADMITANCIA'/)
K1=0
DO 26 K=1,NR
READ(4,7) S,R,RES
K1=K+NLT
NI(K1)=S
NF(K1)=R
PERIOD(K1)=0

TIPO(K1)=RE
YE(K1)=1.0/RES
WRITE(3,28) K,S,R,RES,YE(K1)
28 FORMAT(1H ,3X,I2,12X,I2,13X,I2,9X,E10.3,4X,E10.3)
26 CONTINUE
C
C ***LEA E IMPRIMA INFORMACION DE LOS INDUCTORES***
C
29 IF(NL.EQ.0) GO TO 34
WRITE(3,30) (AST(K),K=1,7),(AST(K1),K1=8,14)
30 FORMAT(1H0/1X,7A4,'***'/ ' *INFORMACION DE LOS INDUCTORES*/1H ,7A4
1,'***'///' INDUCTOR',4X,'NODO INICIAL',4X,'NODO FINAL',4X,'INDUCTA
2NCIA',4X,'ADMITANCIA'/)
K2=0
DO 31 K=1,NL
READ(4,7) S,R,IND
K2=K+NLI+NR
NI(K2)=S
NF(K2)=R
PERIOD(K2)=1
TIPO(K2)=L
YE(K2)=DELTAT/(2.0*IND)
WRITE(3,33) K,S,R,IND,YE(K2)
33 FORMAT(1H ,3X,I2,12X,I2,13X,I2,9X,E10.3,4X,E10.3)
31 CONTINUE
C
C ***LEA E IMPRIMA INFORMACION DE LOS CAPACITORES***
C
34 IF(NC.EQ.0) GO TO 39
WRITE(3,35) (AST(K),K=1,8),(AST(K1),K1=9,16)
35 FORMAT(1H0/1X,8A4,' *INFORMACION DE LOS CAPACITORES*/1H ,8A4///'
1CAPACITOR' NODO INICIAL NODO FINAL CAPACITANCIA ADMITAN
3CIA'/)

```



```

K3=0
DO 36 K=1,NC
  READ(4,7) S,R,CAP
  K3=K+NLT+NR+NL
  N1(K3)=S
  NF(K3)=R
  PERIOD(K3)=1
  TIPO(K3)=C
  YE(K3)=2.0*CAP*1.0F-3/DELTAT
  WRITE(3,38) K,S,R,CAP,YE(K3)
35  FORMAT(1H',3X,I2,13X,I2,13X,I2,9X,E10.3,5X,E10.3)
5   FORMAT(5I5)
6   FORMAT(4E10.3)
7   FORMAT(2I5,3E10.3)
35  CONTINUE
39  RETURN
    END

```

```

LEA2          T150          DATE 83/01/10          TIME
C
C *****
C * SUBROUTINA PARA LA LECTURA E IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA. *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE LEA2
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD, TIPO
C COMMON N1,NLT,NR,NL,NC,DELTAT,FINALT,IGRAF,TIMP,TII,TFI,TIG,TFG
C COMMON N1(100),NF(100),TIPO(100),PERIOD(100),YE(100)
C COMMON FK1(S),FK2(S),FK3(S),ALFA1(S),ALFA2(S),FREQ(S),PHASE(S)
C COMMON TIA(S),TEA(S),NA(S),CLASE(S),NVI(9),NICI(9),NFCI(9),NVG(S)
C COMMON NICG(S),NFCG(S),NVA,NCA,NVIMP,NCIMP,NVGRAF,NCGRAF
C COMMON VOLTIN(21,30),CA(20),YIN(20,21),YAA(15,16),YAB(15,5)
C COMMON T,ITL,ITC,ITD,RI(100,30),FI(100,30),Y(200),TIME(200)
C COMMON AST(20),KG
C DATA EXPO,SLN,COSE,RAM,ESC/'EXPO','SEN','COSE','RAM','ESC'/
C
C ***LEA E IMPRIMA INFORMACION DE LAS CORRIENTES O VOLTAJES APLICADOS
C
C READ(4,5) NVA,NCA
C IF(NVA.EQ.0) GO TO 53
C WRITE(3,41) (AST(K),K=1,9),(AST(K1),K1=10,18),NVA
41  FORMAT(1H',1X,9A4,'***'//'  

1/1X,9A4,'***'//'  

2S UNIDADES DE LAS CONSTANTES SON:'//'  

3 FK3',10X,'=' VOLTIOS/SEG'//'  

4= CICLOS/SEG'//'  

L1=NVA
55  DO 42 K=1,L1
    READ(4,60) NA(K),CLASE(K)
60  FORMAT(15,1X,A4)
    IF(CLASE(K).EQ.EXPO) GO TO 44
    IF(CLASE(K).EQ.SEN.OR.CLASE(K).EQ.COSE) GO TO 45
    IF(CLASE(K).EQ.ESC) GO TO 46
    IF(CLASE(K).EQ.RAM) GO TO 49

```

```

WRITE(3,91)
91 FORMAT(1H1,' SE HA ESPECIFICADO MAL EL TIPO DE UNO DE LOS VOLTAJES
10 CORRIENTES APLICADAS. LA EJECUCION HA SIDO CANCELADA')
STOP
44 READ(4,6) FK1(K),ALFA1(K),FK2(K),ALFA2(K),TIA(K),TFA(K)
WRITE(3,50) K,NA(K),CLASE(K),FK1(K),ALFA1(K),FK2(K),ALFA2(K),TIA(
1),TFA(K)
50 FORMAT('  NO.',7X,'NODO',4X,'TIPO',7X,'FK1',11X,'ALFA1',9X,'FK2',
11X,'ALFA2',6X,'TIEMPO INICIAL',4X,'TIEMPO FINAL'//4X,I1,9X,I2,5X,
2A4,4(4X,E10,3),6X,E10,3,7X,E10,3//)
ALFA1(K)=ALFA1(K)*DELTAT*1.0E-3
ALFA2(K)=ALFA2(K)*DELTAT*1.0E-3
GO TO 42
45 READ(4,6) FK1(K),FREQ(K),PHASE(K),TIA(K),TFA(K)
WRITE(3,43) K,NA(K),CLASE(K),FK1(K),FREQ(K),PHASE(K),TIA(K),TFA(K)
43 FORMAT('  NO.',7X,'NODO',4X,'TIPO',7X,'FK1',9X,'FREQ',6X,'FASE',
1X,'TIEMPO INICIAL',4X,'TIEMPO FINAL'//4X,I1,9X,I2,5X,A4,4X,E10,3,
2X,F6,2,4X,F6,2,6X,E10,3,7X,E10,3//)
PIE=3.1415926536
FREQ(K)=2.0*PIE*FREQ(K)*DELTAT*1.0E-3
PHASE(K)=PHASE(K)*PIE/180.00
GO TO 42
46 READ(4,6) FK1(K),TIA(K),TFA(K)
WRITE(3,52) K,NA(K),CLASE(K),FK1(K),TIA(K),TFA(K)
52 FORMAT('  NO.',7X,'NODO',4X,'TIPO',7X,'FK1',8X,'TIEMPO INICIAL',
1X,'TIEMPO FINAL'//4X,I1,9X,I2,5X,A4,4X,E10,3,6X,E10,3,7X,E10,3//)
GO TO 42
89 READ(4,6) FK3(K),TIA(K),TFA(K)
WRITE(3,90) K,NA(K),CLASE(K),FK3(K),TIA(K),TFA(K)
90 FORMAT('  NO.',7X,'NODO',4X,'TIPO',7X,'FK3',8X,'TIEMPO INICIAL',
1X,'TIEMPO FINAL'//4X,I1,9X,I2,5X,A4,4X,E10,3,6X,E10,3,7X,E10,3//)
FK3(K)=FK3(K)*DELTAT*1.0E-3
42 CONTINUE
GO TO 57
53 IF(NCA.EQ.0) GO TO 56
WRITE(3,54) (AST(K),K=1,10),(AST(K1),K1=11,20),NCA
54 FORMAT(1H0/1X,10A4,'*///' *INFORMACION DE LAS CORRIENTES APLICADAS*
1'/1X,10A4,'*///' NUMERO DE CORRIENTES APLICADAS =',3X,I1///'
2LAS UNIDADES DE LAS CONSTANTES SON: ///' FK1 = FK2 = AMPERIOS'
3/' FK3',10X,'= AMPERIOS/SEG'/' ALFA1 = ALFA2 = 1/SEG'/' FREQ',1
40X,'= CICLOS/SEG'/' PHASE',9X,'= GRADOS'//)
L1=NCA
GO TO 55
55 WRITE(3,60)
60 FORMAT(1H0// ' NO EXISTEN CORRIENTES O VOLTAJES APLICADOS AL SISTEMA'
1A'////)
C
C ***LEA E IMPRIMA OPCIONES PARA DATOS DE SALIDA***
C
57 WRITE(3,58) (AST(K),K=1,7),(AST(K1),K1=1,7)
58 FORMAT(1H ,7A4,'***'/' *OPCIONES PARA DATOS DE SALIDA*'/1H ,7A4,'*
1**')
READ(4,5) NVIMP
IF(NVIMP.EQ.0) GO TO 64
WRITE(3,73) NVIMP
78 FORMAT(1H0/' NUMERO DE VOLTAJES A IMPRIMIRSE = ',I1//6X,'COLUMNA
1 NO.',6X,'NODO'//)
READ(4,5) (NVI(K),K=1,NVIMP)
DO 61 K=1,NVIMP
K1=K+1
WRITE(3,63) K1,NVI(K)
63 FORMAT(1H ,10X,I2,11X,I2)
61 CONTINUE
64 READ(4,5) NCIMP
IF(NCIMP.EQ.0) GO TO 69
WRITE(3,65) NCIMP
65 FORMAT(1H0/' NUMERO DE CORRIENTES A IMPRIMIRSE = ',I1//1X,'COLUM
1NA NO.',4X,'NODO INC.',4X,'NODO FINAL'//)
DO 66 K=1,NCIMP
READ(4,5) NICI(K),NFCI(K)
K1=NVIMP+K+1
WRITE(3,66) K1,NICI(K),NFCI(K)
66 FORMAT(5X,I2,13X,I2,11X,I2)

```

```

66 CONTINUE
67 READ(4,5) NVGRAF
   IF(NVGRAF.EQ.0) GO TO 73
   WRITE(3,70) NVGRAF
70 FORMAT(1H0/' NUMERO DE VOLTAJES A GRAFICARSE = ',I1//14X,'*0000*
   1)
   READ(4,5) (NVG(K),K=1,NVGRAF)
   DO 71 K=1,NVGRAF
   WRITE(3,72) NVG(K)
72 FORMAT(15X,12)
71 CONTINUE
73 READ(4,5) NCGRAF
   IF(NCGRAF.EQ.0) GO TO 77
   WRITE(3,74) NCGRAF
74 FORMAT(1H0/' NUMERO DE CORRIENTES A GRAFICARSE = ',I1//5X,'*000
   1INC.',4X,'*0000 FINAL*')
   DO 75 K=1,NCGRAF
   READ(4,5) NICG(K),NFCG(K)
   WRITE(3,76) NICG(K),NFCG(K)
75 FORMAT(9X,12,12X,12)
75 CONTINUE
5 FORMAT(9I5)
6 FORMAT(8E10,3)
77 RETURN
END

```

MATADM T150 DATE 83/01/10 TIME

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA CALCULAR LA MATRIZ ADMITANCIA *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE MATADM
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD,TIPO,RE,C
C COMMON NN,NLT,NR,NL,NC,DELTA,T,FINAL,T,GRAF,TIMP,TII,TFI,TIG,TFS
C COMMON NI(100),NF(100),TIPO(100),PERIOD(100),YE(100)
C COMMON FK1(5),FK2(5),FK3(5),ALFA1(5),ALFA2(5),FREQ(5),PHAS(5)
C COMMON TIA(5),TFA(5),IA(5),CLASE(5),NVI(9),NICI(9),NFCI(9),NVG(5)
C COMMON NICG(5),NFCG(5),NVA,NCA,NVIMP,NCIMP,NVGRAF,NCGRAF
C COMMON VOLTIN(21,30),CA(20),YN(20,21),YAA(15,15),YAB(15,5)
C COMMON T,ITL,ITC,ITD,RI(100,30),FI(100,30),Y(200),TIME(200)
C COMMON AST(20),KG
C DATA LT,RE,L,C/'LT','R','L','C'/
C
C ***LIMPIAR ARREGLO***
C
C DO 3 K=1,20
C DO 3 K1=1,21
C 3 YN(K,K1)=0.0
C
C ***DETERMINAR LA MATRIZ ADMITANCIA***
C
C NE=NLT+NR+NL+NC
C DO 1 I=1,NE
C NU=NI(I)
C NT=NF(I)
C YN(NU,NU)=YN(NU,NU)+YL(I)

```

```

IF (NT.EQ.21) GO TO 1
YN(NT,NT)=YN(NT,NT)+YL(M)
IF (TIPO(Y).EQ.LT) GO TO 2
YN(NO,NT)=YN(NO,NT)-YL(M)
YN(NT,NO)=YN(NO,NT)
GO TO 1
2 YN(NO,NT)=0.0
YN(NT,NO)=YN(NO,NT)
1 CONTINUE

```

```

C
C ***IMPRIMA RESULTADOS***

```

```

C
WRITE(3,78) (AST(K),K=1,2),(AST(K1),K1=3,4)
78 FORMAT(1H1,2A4,'**'/ ' ',8X,'**/' *SOLUCION*/' *',8X,'**/'1H ,2A4,
1'**'//)
IF (NN.GT.10) GO TO 82
WRITE(3,79) (AST(K),K=1,9),(AST(K1),K1=10,10)
79 FORMAT(1H ,9A4/' *MATRIZ ADMITANCIA DEL SISTEMA (YN)*'/1H ,9A4//)
DO 80 K=1,NN
80 WRITE(3,81) (YN(K,K1),K1=1,NN)
81 FORMAT(1H ,9(E10.3,3X),E10.3)

```

```

82 RETURN
END

```

```

PARAM T150 DATE 83/01/10 TIME

```

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA REALIZAR LA PARTICION DE LA MATRIZ ADMITANCIA *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE PARAMAT
C
IMPLICIT INTEGER*2(1-N)
INTEGER*2 PERIOD,TIPO
COMMON NN,NLT,NR,NL,NC,DELTAT,FINALT,TGRAF,TIMP,TII,TFI,TIS,TFG
COMMON NI(100),NE(100),TIPO(100),PERIOD(100),YE(100)
COMMON FK1(5),FK2(5),FK3(5),ALFA1(5),ALFA2(5),FREQ(5),PHASE(5)
COMMON TIA(5),TEA(5),NA(5),CLASL(5),NVI(9),NICI(9),NFCI(9),NVG(5)
COMMON NICG(5),NFCG(5),NVA,NCA,NVIMP,NCIMP,NVGRAF,NCGRAF
COMMON VOLTIN(21,30),CA(20),YN(20,21),YAA(15,16),YAB(15,5)
COMMON T,ITL,ITC,ITD,NI(100,30),FI(100,30),Y(200),TIME(200)
COMMON AST(20),KG
DIMENSION KFIL(15),KCOL(15)
C
C ***LIMPIAR ARREGLOS***
C
DO 1 K2=1,15
KFIL(K2)=0
KCOL(K2)=0
1 CONTINUE
DO 12 K=1,15
DO 12 J=1,16
12 YAA(K,K1)=0.0
DO 13 K=1,15
DO 13 K1=1,5
13 YAB(K,K1)=0.0
C
C ***DETERMINACION DE LA SUMATRIZ YAA***
C

```

```

K=1
DO 2 IF=1,NN
DO 3 K1=1,NVA
IF(IF.EQ.NA(K1)) GO TO 2
3 CONTINUE
KFIL(K)=IF
KCOL(K)=IF
K=K+1
2 CONTINUE
IK=NN-NVA
DO 4 IF=1,IK
M=KFIL(IF)
DO 5 IC=1,IK
N=KCOL(IC)
YAA(IF,IC)=YN(M,N)
5 CONTINUE
4 CONTINUE
C
C   ***LIMPIAR ARREGLO***
C
DO 6 K2=1,15
KCOL(K2)=0
6 CONTINUE
C
C   ***DETERMINACION DE LA SUBMATRIZ YAB***
C
K=1
DO 7 NO=1,NN
DO 8 K1=1,NVA
IF(NO.EQ.NA(K1)) GO TO 9
8 CONTINUE
GO TO 7
9 KCOL(K)=NO
K=K+1
7 CONTINUE
DO 10 IF=1,IK
M=KFIL(IF)
DO 11 IC=1,NVA
N=KCOL(IC)
YAB(IF,IC)=YN(M,N)
11 CONTINUE
10 CONTINUE
C
C   ***IMPRESION RESULTADOS***
C
IF(IK.GT.10) GO TO 87
WRITE(3,83) (AST(K),K=1,8),(AST(K1),K1=9,16)
83 FORMAT(1H0/1H ,8A4/' *SUBMATRIZ DE ADMITANCIAS (YAA)*'/1H ,8A4//)
DO 84 K=1,IK
84 WRITE(3,81) (YAA(K,K1),K1=1,IK)
WRITE(3,85) (AST(K),K=1,8),(AST(K1),K1=9,16)
85 FORMAT(1H0/1H ,8A4/' *SUBMATRIZ DE ADMITANCIAS (YAB)*'/1H ,8A4//)
DO 86 K=1,IK
86 WRITE(3,81) (YAB(K,K1),K1=1,NVA)
81 FORMAT(1H ,9(E10.3,3X),E10.3)
87 RETURN
END

```

```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA LA GENERACION DE ONDAS *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE ONDAS
C
  IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
  INTEGER*2 PERIOD, TIPO
  COMMON NI, NLT, NR, NL, NC, DELTAT, FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG
  COMMON NI(100), NE(100), TIPO(100), PERIOD(100), YE(100)
  COMMON FK1(5), FK2(5), FK3(5), ALFA1(5), ALFA2(5), FREQ(5), PHASE(5)
  COMMON TIA(5), TFA(5), NA(5), CLASE(5), NVI(9), NICI(9), NFCI(9), NVG(5)
  COMMON NICG(5), NFCG(5), NVA, NCA, NVIMP, NCIMP, NVGRAF, NCGRAF
  COMMON VOLTN(21,30), CA(20), YN(20,21), YAA(15,16), YAB(15,5)
  COMMON T, ITL, ITC, ITD, RI(100,30), FI(100,30), Y(200), TIME(200)
  COMMON ASI(20), KG
  DATA EXPD, SEN, COSE, RAM, ESC/'EXPD', 'SEN', 'COSE', 'RAM', 'ESC'/
  IF(NVA.EQ.0) GO TO 7
  DO 1 K=1, NVA
    TID=TIA(K)/DELTAT
    IT1=TIA(K)/DELTAT
    DEC=TID-IT1
    IF(DEC.GT.0.5) IT1=IT1+1
    TED=TFA(K)/DELTAT
    IT2=TFA(K)/DELTAT
    DEC=TED-IT2
    IF(DEC.GT.0.5) IT2=IT2+1
    IF(IT1.GT.ITC.OR.IT2.LT.ITC) GO TO 15
    M=NA(K)
    IF(CLASE(K).EQ.EXPD) GO TO 2
    IF(CLASE(K).EQ.SEN) GO TO 3
    IF(CLASE(K).EQ.COSE) GO TO 4
    IF(CLASE(K).EQ.ESC) GO TO 5
    IF(CLASE(K).EQ.RAM) GO TO 6
    GO TO 1
  2 A1=-ALFA1(K)*ITC
    A2=-ALFA2(K)*ITC
    VOLTN(M,ITD)=FK1(K)*EXP(A1)-FK2(K)*EXP(A2)
    GO TO 1
  3 A1=FREQ(K)*ITC
    A2=PHASE(K)
    VOLTN(M,ITD)=FK1(K)*SIN(A1+A2)
    GO TO 1
  4 A1=FREQ(K)*ITC
    A2=PHASE(K)
    VOLTN(M,ITD)=FK1(K)*COS(A1+A2)
    GO TO 1
  5 VOLTN(M,ITD)=FK1(K)
    GO TO 1
  6 VOLTN(M,ITD)=FK3(K)*ITC
    GO TO 1
  15 M=NA(K)
    VOLTN(M,ITD)=0.0
  1 CONTINUE
  7 IF(NCA.EQ.0) GO TO 14
  DO 8 K=1, NCA
    TID=TIA(K)/DELTAT
    IT1=TIA(K)/DELTAT
    DEC=TID-IT1
    IF(DEC.GT.0.5) IT1=IT1+1
    TED=TFA(K)/DELTAT
    IT2=TFA(K)/DELTAT
    DEC=TED-IT2
    IF(DEC.GT.0.5) IT2=IT2+1
    IF(IT1.GT.ITC.OR.IT2.LT.ITC) GO TO 16
    M=NA(K)
    IF(CLASE(K).EQ.EXPD) GO TO 9
    IF(CLASE(K).EQ.SEN) GO TO 10
    IF(CLASE(K).EQ.COSE) GO TO 11
    IF(CLASE(K).EQ.ESC) GO TO 12
    IF(CLASE(K).EQ.RAM) GO TO 13

```

```

GO TO 8
9  A1=-ALFA1(K)*ITC
   A2=-ALFA2(K)*ITC
   CA(M)=FK1(K)*EXP(A1)-FK2(K)*EXP(A2)
   GO TO 8
10 A1=FREQ(K)*ITC
   A2=PHASE(K)
   CA(M)=FK1(K)*SIN(A1+A2)
   GO TO 8
11 A1=FREQ(K)*ITC
   A2=PHASE(K)
   CA(M)=FK1(K)*COS(A1+A2)
   GO TO 8
12 CA(M)=FK1(K)
   GO TO 8
13 CA(M)=FK3(K)*ITC
   GO TO 8
16 M=NA(K)
   CA(M)=0.0
8  CONTINUE
14 RETURN
   END

```

```

GAUSS          T150          DATE 83/01/10          TIME
C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA RESOLVER UN SISTEMA DE N ECUACIONES *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE GAUSS
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD,TIPO
C COMMON NI,NLT,NR,NL,NC,DELTAT,FINALT,TGRAF,TIMP,TII,TFI,TIG,TFG
C COMMON NI(100),NE(100),TIPO(100),PERIOD(100),YE(100)
C COMMON FK1(5),FK2(5),FK3(5),ALFA1(5),ALFA2(5),FREQ(5),PHASE(5)
C COMMON TIA(5),TEA(5),NA(5),CLASE(5),NVI(9),NICI(9),NFCI(9),NVC(5)
C COMMON NICG(5),NFCG(5),NVA,NCA,NVIMP,NCIMP,NVGRAF,NCGRAF
C COMMON VOLTN(21,30),CA(20),YN(20,21),YAA(15,16),YAB(15,5)
C COMMON T,ITL,ITC,ITD,RI(100,30),FI(100,30),Y(200),TIME(200)
C COMMON AST(20),KG
C DIMENSION A(20,21)
C IR=NI-NVA
C NPI=IR+1
C EPS=1.0E-30
C IF(NVA.EQ.0) GO TO 18
C DO 15 IF=1,IK
C DO 15 IC=1,NPI
15 A(IF,IC)=YAA(IF,IC)
C GO TO 19
19 DO 17 IF=1,IK
C DO 17 IC=1,NPI
17 A(IF,IC)=YN(IF,IC)
C
C ***ELIMINACION HACIA ADELANTE***
C
C ***BUSQUEDA DE LA FILA DEL PIVOTE***
C
19 IC=1
   IR=1

```

```

1 PIVOT=A(IR,IC)
  IPIVOT=IR
  DO 2 I=IR,IK
    BEA(I,IC)
    C1=ABS(b)
    C2=ABS(PIVOT)
    IF(C1.LE.C2) GO TO 2
  PIVOT=A(I,IC)
  IPIVOT=I
2 CONTINUE

```

```

C
C   ***INTERCAMBIO DE FILAS***
C

```

```

  C3=ABS(PIVOT)
  IF(C3.LE.LPS) GO TO 3
  IF(IPIVOT.G.IR) GO TO 4
  DO 3 K=IC,NP1
    B=A(IPIVOT,K)
    A(IPIVOT,K)=A(IR,K)
    A(IR,K)=B
3 CONTINUE
4 CONTINUE

```

```

C
C   ***NORMALIZE EL PIVOTE***
C

```

```

  DO 5 K=IC,NP1
5 A(IR,K)=A(IR,K)/PIVOT
  IF(IR.G.IK) GO TO 10
  IRP1=IR+1

```

```

C
C   ***REDUCCION DE COLUMNAS***
C

```

```

  DO 7 IP=IRP1,IK
    B=A(IP,IC)
    C4=ABS(b)
    IF(C4.LE.LPS) GO TO 7
    DO 6 K=IC,NP1
      A(IP,K)=A(IP,K)-A(IR,K)*B
6 CONTINUE
7 CONTINUE
  IR=IR+1
  IC=IC+1
  GO TO 1

```

```

8 WRITE(3,9)
9 FORMAT(141,'EL DETERMINANTE DEL SISTEMA ES IGUAL A CERO, LA SOLUCI
ION NO ES UNICA')
STOP

```

```

C
C   ***SUSTITUCION HACIA ATRAS***
C

```

```

10 NM1=IK-1
  DO 12 K=1,NM1
    NMK=IK-K
    DO 11 J=1,K
      NP1MJ=IK+1-J
11 A(NMK,NP1)=A(NMK,NP1)-A(NMK,NP1MJ)*A(NP1MJ,NP1)
12 CONTINUE
  IF(NVA.E.0) GO TO 21
  DO 16 IF=1,IK
15 YAA(IF,NP1)=A(IF,NP1)
  GO TO 22
21 DO 20 IF=1,IK
20 YN(IF,NP1)=A(IF,NP1)
22 RETURN
  END

```



```

C *****
C *
C * SUBROUTINA PARA GRAFICAR LOS VOLTAJES Y CORRIENTES DE SALIDA *
C *
C *****
C
C SUBROUTINE PLOT (NF1)
C
C IMPLICIT INTEGER*2(I-N)
C INTEGER*2 PERIOD, TIPO
C COMMON NR, NLT, NR, NL, NC, DELTAT, FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TFG
C COMMON NI(100), NE(100), TIPO(100), PERIOD(100), YE(100)
C COMMON FK1(5), FK2(5), FK3(5), ALFA1(5), ALFA2(5), FREQ(5), PHASE(5)
C COMMON IIA(5), IEA(5), IA(5), CLASL(5), NVI(9), NICI(9), NECI(9), NVG(5)
C COMMON NIG(5), NFCG(5), IVA, ICA, NVIMP, NCIMP, NVGRAF, NCGRAF
C COMMON VOLTIN(21,30), CA(20), YN(20,21), YAA(15,16), YAB(15,5)
C COMMON T, ITL, ITC, ITD, RI(100,30), FI(100,30), Y(200), TIME(200)
C COMMON ASI(20), KG
C DIMENSION LINE(101)
C DATA JL, JN, JP, JI, JB, JZ/'X', '-', '+', 'I', ' ', ' ', 'B'/
C
C *****REESCALE DATOS PARA CUBRIR EL RANGO DE LA ORDENADA*****
C
C YMAX=-1.0E+50
C YMIN=1.0E+50
C DO 9 I=1, NF1
C IF(Y(I).GT.YMAX) YMAX=Y(I)
C 9 IF(Y(I).LT.YMIN) YMIN=Y(I)
C IF(YMAX.EQ.YMIN) YMIN=0.0
C RANGE=YMAX-YMIN
C TEMP=100.0/RANGE
C DO 13 I=1, NF1
C 13 Y(I)=(Y(I)-YMIN)*TEMP
C RVV=-YMIN*TEMP
C DO 20 I=1, 101
C 20 LINE(I)=JB
C N=1
C GO TO 28
C 27 IF((N-1)/10-(N-2)/10) 37,37,28
C
C *****CONSTRUYA LINEA GRAFICA DE LA ORDENADA*****
C
C 28 ND=0
C DO 34 I=1, 10
C ND=ND+1
C LINE(ND)=JP
C DO 34 J=1, 9
C ND=ND+1
C 34 LINE(ND)=JN
C LINE(101)=JP
C GO TO 39
C
C *****CONSTRUYA LINEA GRAFICA DE LAS ABCISAS*****
C
C 37 DO 38 I=1, 101, 10
C 38 LINE(I)=JI
C
C *****CAMBIE DATOS NUMERICOS A LETRAS*****
C
C 39 JA=Y(N)+1.4999999
C IF(.JA-101) 43,43,44
C 43 IF(.JA) 46,46,43
C 44 LINE(101)=JZ
C GO TO 49
C 46 LINE(I)=JZ
C GO TO 49
C 48 LINE(JA)=JL
C
C *****IMPRESION LINEA DE DATOS*****
C
C 49 IF(Y(N).EQ.RVV) GO TO 70
C Y(N)=Y(N)/TEMP+YMIN
C GO TO 50

```

```
70 Y(N)=0.0
80 WRITE(3,53) TIME(N),LINE,Y(N)
53 FORMAT(1H ,E12.5,2X,101A1,1X,E12.5)
```

```
C
C *****PONGA EN CERO LAS VARIABLES*****
```

```
C
DO 58 I=1,101
58 LINE(I)=JJ
   NEN+1
   IF(N-NE1) 27,27,61
61 RETURN
   END
```

5.2.5. Datos de Entrada requeridos por el Programa

y Opciones para los Datos de Salida

Los datos de entrada y las opciones para los datos de salida son leídos por las subrutinas LEA1 y LEA2, a continuación se detalla la manera como deben ingresarse dichos datos al programa BERGE, en general:

1. Todos los datos del sistema deben especificarse en las siguientes unidades:

VOLTAJES	VOLTIOS
CORRIENTES	AMPERIOS
FRECUENCIAS	CICLOS/SEGUNDO
ANGULOS	GRADOS
RESISTENCIAS	OHMIOS
INDUCTANCIAS	MILIHENRIOS
CAPACITANCIAS	MICROFARADIOS
TIEMPOS	MILISEGUNDOS
LONGITUDES	MILLAS

2. Al nodo de tierra se le debe asignar el número 21 y siempre debe ser ingresado como nodo final o de recepción.

3. A todas las barras se les debe dar nombres numéricos así: 1,4,7,etc.; no puede dársele el mismo número a dos barras diferentes.
4. No se debe asignar el valor cero a ninguna resistencia, inductancia o capacitancia, si el caso lo requiere se puede usar un número tan pequeño como 1×10^{-30} .

El uso del programa requiere la creación de un procedimiento, las cuatro primeras filas de dicho procedimiento deben ser:

```
// LOAD BERGE
// FILE NAME-FT00015, RETAIN-T, RECORDS-200,
  LABEL-FILE15.
// FILE NAME-FT00016, RETAIN-T, RECORDS-200,
  LABEL-FILE16
// RUN
```

A partir de la quinta fila se ingresan los datos del sistema necesarios para realizar el estudio, a continuación se da una lista de los nombres asignados a las variables de entrada.

NN	Número de nodos ($NN \leq 20$)
NLT	Número de líneas de transmisión
NR	Número de resistores
NL	Número de inductores
NC	Número de Capacitores
	$(NLT+NR+NL \leq 50)$
DELTAT	Intervalo de integración
FINALT	Tiempo final del estudio
TGRAF	Intervalo de graficación
TIMP	Intervalo de impresión
TII	Tiempo inicial de impresión
TFI	Tiempo final de impresión
TIG	Tiempo inicial de graficación
TFG	Tiempo final de graficación
S	Nodo inicial
R	Nodo final
RES	Resistencia
IND	Inductancia
CAP	Capacitancia
LONG	Longitud de las líneas

$$\left(\frac{LONG \sqrt{IND \cdot CAP \cdot 10^{-9}}}{DELTAT} \cdot 10^3 \leq 30 \right)$$

NVA	Número de voltajes aplicados ($NVA \leq 5$)
NCA	Número de corrientes aplicadas - ($NCA \leq 5$)

NA Número del nodo al cual se le aplica un voltaje o corriente.
 CLASE Clave que indica el tipo de perturbación.

Las claves que permiten escoger los tipos de perturbación deseados y que son leídas con formato A.4, son:

EXPO Onda tipo exponencial
 SEN Onda tipo senoidal
 COSE Onda tipo cosenoidal
 ESC Onda tipo escalón
 RAM Onda tipo rampa

Las ondas tipo exponencial se generan de acuerdo a la ecuación:

$$F(t) = FK1 \exp(-ALFA1.t) - FK2 \exp(-ALFA2.t)$$

Las constantes FK1 y FK2 deben ingresarse en voltios o amperios según F(t) sea una onda de voltaje o de corriente; ALFA1 y ALFA2 deben ingresarse en (seg.)⁻¹.

Las ondas tipo senoidal o cosenoidal se gene

ran de acuerdo a las ecuaciones:

$$F(t) = FK1 \text{ SEN}(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t + \text{PHASE})$$

$$F(t) = FK1 \text{ COS}(2\pi \cdot \text{FREQ} \cdot t + \text{PHASE})$$

Las unidades de las constancias son FK1 en voltios o amperios según el caso, FREQ en ciclos/seg y PHASE en grados.

Las ondas tipo escalón se generan de acuerdo a la ecuación:

$$F(t) = FK1$$

FK1 en voltios o amperios.

Las ondas tipo rampa se generan de acuerdo a la ecuación:

$$F(t) = FK3 \cdot t$$

FK3 debe ingresarse en voltios/seg o amperios/seg según el caso.

TIA Tiempo al cual se inicia la perturbación.

TFA Tiempo al cual cesa la perturbación.

Todas las señales de perturbación deben ser aplicadas al mismo tiempo, es decir no es posible aplicarlas a tiempos diferentes.

NVIMP Número de voltajes que van a imprimirse.

NCIMP Número de corrientes que van a imprimirse

(NVIMP+NCIMP \leq 9)

NVI Número del nodo cuyo voltaje va a imprimirse.

NICI Número del nodo inicial de la corriente a imprimirse.

NFCI Número del nodo final de la corriente a imprimirse.

NVGRAF Número de voltajes que van a graficarse (NVGRAF \leq 5)

NVG Número del nodo cuyo voltaje va a graficarse.

NCGRAF Número de corrientes que van a ser graficadas (NCGRAF \leq 5).

NICG Número del nodo inicial de la corriente a graficarse.

NFCG Número del nodo final de la corriente a graficarse.

Existe un límite en el número de gráficos para cada ejecución del programa y en el número de valores a graficarse en cada gráfico, de aquí que sea necesario tener cuidado al escoger TGRAF, TIG y TFG de manera tal que el número de puntos a graficarse en cada gráfico sea de 200 como máximo.

Es conveniente que los tiempos FINALT, TGRAF, TIMP, TII, TFI, TIG, TIA y TFA, sean un múltiplo entero de DELTAT a fin de evitar errores de redondeo durante la ejecución del programa.

Al ingresar los datos acerca de los elementos del sistema se lo debe hacer en un sólo sentido, por ejemplo los datos del elemento entre los nodos 1 y 2 deben ingresarse en la rama 1, 2 o 2, 1, pero no en ambas ya que el programa realiza automáticamente esta tarea.

Los valores de NVA y NCA no pueden ser cero o diferentes de cero al mismo tiempo.

Puesto que existe un número considerable de

datos de entrada se optó por usar sentencias FORTRAN para indicar el orden y los formatos que se siguen para la lectura de dichos datos. A continuación se dan una serie de instrucciones de lectura con sus respectivos -formatos así como instrucciones de decisión que explican la manera correcta de ingresar los datos de entrada al programa. Según se mencionó anteriormente la lectura de estos datos comienza a partir de la quinta fila -del procedimiento, a cada instrucción READ -debe corresponderle una fila de datos en el procedimiento, muchas veces las instrucciones de lectura están dentro de un lazo DO debiendo existir entonces tantas filas de datos como veces que dicho lazo se ejecuta, así deben existir por ejemplo tantas filas de información sobre las líneas como líneas existen en el sistema.

```
READ(4,5) NN, NLT, NR, NL, NC
```

```
READ (4,6) DELTAT, FINALT, TGRAF, TIMP
```

```
READ (4,6) TII, TFI, TIG, TFG.
```

```
IF(NLT.EQ.0)GO TO 18
```

```
      DO 15 K=1,NLT
      READ(4,7) S,R,IND,CAP,LONG
15  CONTINUE

18  IF(NR.EQ.0) GO TO 29

      DO 26 K=1,NR
      READ(4,7) S,R,RES
26  CONTINUE

29  IF(NL.EQ.0) GO TO 34

      DO 31 K=1,NL
      READ(4,7) S,R,IND
31  CONTINUE

34  IF(NC.EQ.0) GO TO 39

      DO 36 K=1,NC
      READ(4,7) S,R,CAP
36  CONTINUE

39  READ(4,5) NVA, NCA
      IF(NVA.EQ.0) GO TO 53
```

```
L1 = NVA
55 DO 42 K=1, L1
    READ (4,80) NA(K), CLASE (K)
    IF (CLASE (K) EQ.EXPO) GO TO 44
    IF (CLASE (K). EQ. SEN. OR. CLASE (K). EQ. COSE)
    GO TO 45
    IF (CLASE (K) EQ.ESC) GO TO 46
    IF (CLASE (K) EQ.RAM) GO TO 89
    STOP
44 READ (4,6) FK1(K), ALFA(K), FK2(K),ALFA2(K),
    1TIA(K), TFA(K)
    GO TO 42
45 READ (4,6) FK1(K), FREQ(K), PHASE(K), TIA(K),
    1TFA(K)
    GO TO 42
46 READ (4,6) FK1(K), TIA(K), TFA(K)
    GO TO 42
89 READ (4,6) FK3(K), TIA(K), TFA(K)
42 CONTINUE

    GO TO 57

53 IF (NCA.EQ.0) GO TO 56
    L1 = NCA

    GO TO 55

56 STOP

57 READ (4,5) NVIMP
```

```

      IF (NVIMP.EQ.0) GO TO 64
      READ (4,5) (NVI(K),K=1,NVIMP)
64  READ (4,5) NCIMP
      IF (NCIMP.EQ.0) GO TO 69
      DO 66 K=1,NCIMP
      READ (4,5) NICI(K),NFCI(K)
66  CONTINUE

69  READ (4,5) NVGRAF
      IF (NVGRAF.EQ.0) GO TO 73
      READ (4,5) (NVG(K), K=1, NVGRAF)

73  READ (4,5)  NCGRAF
      IF (NCGRAF.EQ.0) GO TO 77
      DO 75 K=1, NCGRAF
      READ (4,5) NICG(K), NFCG(K)

75  CONTINUE

77  STOP

      5  FORMAT (5I5)
      6  FORMAT (8E10.3)
      7  FORMAT (2I5, 3E10.3)
      80 FORMAT (I5,1X,A4)
```

5.3. EJEMPLO DE APLICACION DEL PROGRAMA A PROBLEMAS ESPECIFICOS

Con el objeto de comprobar que el programa previamente descrito conduce a resultados correctos, se usaron varios ejemplos los cuales se detallan a continuación así como los resultados obtenidos en cada caso.

EJEMPLO 1

La figura 5.3.1. muestra un circuito R-L-C serie. Se escogió este ejemplo puesto que consiste enteramente de elementos concentrados y permite apreciar la habilidad del método de Bergerón para manejar los elementos reactivos concentrados.

De la teoría de circuitos se puede demostrar que la condición para amortiguamiento crítico se presenta cuando:

$$R = 2\sqrt{L/C}$$

Sustituyendo los valores dados a continuación, la ecuación anterior da un valor de $R=663.32 \Omega$ para el amortiguamiento crítico.

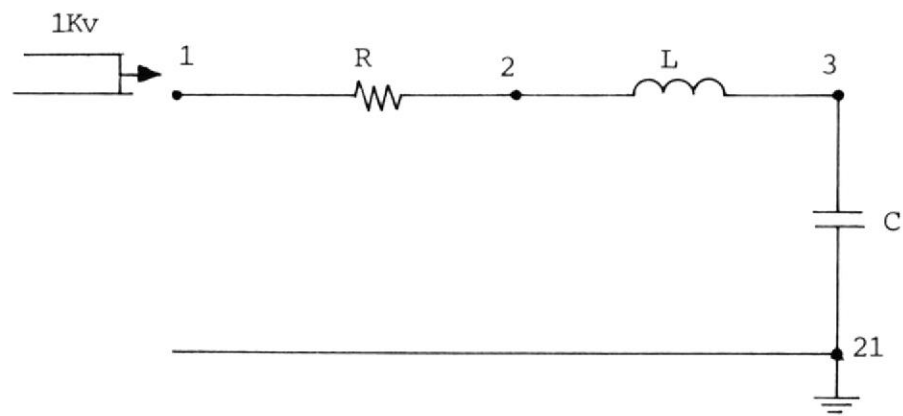


FIGURA 5.3.1. CIRCUITO R-L-C SERIE

Los valores asignados a R son los siguientes:

- a) $R=1.0 \times 10^{-20} \Omega$ para simular el caso no amortiguado.
- b) $R=331.66 \Omega$ caso subamortiguado
- c) $R=663.32 \Omega$ caso críticamente amortiguado
- d) $R=994.99 \Omega$ caso sobreamortiguado

Los resultados se obtuvieron usando un Intervalo de Integración $\Delta t = 0.5 \text{ useg}$, los datos son los siguientes:

$$L = 0.00165 \text{ H}$$

$$C = 0.015 \text{ uF}$$

Fuente: onda escalón de magnitud 1 Kv aplicada al tiempo $t = 0$

El procedimiento usado y la impresión de los datos de entrada para el caso subamortiguamiento se dan en las figuras 5.3.2 y 5.3.3.

Los gráficos del voltaje del capacitor (en voltios) en función del tiempo (en mseg) correspondientes a cada caso son los siguientes:

BERGE T150

DATE 82/12/09

TIME 22.20

// LOAD BERGE

// FILE NAME=FT00015,RETAIN=T,RECORDS=200,LABEL=FILE15

// FILE NAME=FT00016,RETAIN=T,RECORDS=200,LABEL=FILE16

// RUN

3	0	1	1	1	
0.5E-3		60.0E-3		0.5E-3	0.5E-3
	0.0	30.0E-3		0.0	50.0E-3
1	2	331.63			
2	3	1.65			
3	21	0.015			
1	0				
1	ESC				
1.0E+3		0.0	60.0E-3		
3					
1	2	3			
1					
3	21				
1					
3					
1					
3	21				

FIGURA 5.3.2. HOJA DE DATOS
DE ENTRADA.

LAS UNIDADES SON:

VOLTAJES = VOLTIOS
 CORRIENTES = AMPERIOS
 FREQUENCIAS = CICLOS/SEG
 ANGULOS = GRADOS
 LONGITUDES = METROS
 ALIMENTACIONES = MMOS
 INDUCTANCIAS = MICROHENRIOS
 CAPACITANCIAS = MICROFARSIOS
 TIEMPO = MILLISEGUNDOS
 LONGITUD = MILLAS

 DATOS DE ENTRADA

NUMERO DE NODOS = 3
 NUMERO DE LINEAS = 0
 NUMERO DE RESISTORES = 1
 NUMERO DE INDUCTORES = 1
 NUMERO DE CAPACITORES = 1

INTERVALO DE INTEGRACION = 0.000E-03
 INTERVALO DE IMPRESION = 0.000E-03
 INTERVALO DE GRAFICACION = 0.000E-03
 TIEMPO INICIAL DE IMPRESION = 0.000E+00
 TIEMPO INICIAL DE GRAFICACION = 0.000E+00
 TIEMPO FINAL DE IMPRESION = 0.000E-01
 TIEMPO FINAL DE GRAFICACION = 0.000E-01
 TIEMPO FINAL DE CALCULO = 0.000E-01

 INFORMACION DE LOS RESISTORES

RESISTOR	NODO INICIAL	NODO FINAL	RESISTENCIA	ADMITANCIA
1	1	2	0.332E+03	0.302E-02

 INFORMACION DE LOS INDUCTORES

INDUCTOR	NODO INICIAL	NODO FINAL	INDUCTANCIA	ADMITANCIA
1	2	3	0.165E+01	0.152E-03

 INFORMACION DE LOS CAPACITORES

CAPACITOR	NODO INICIAL	NODO FINAL	CAPACITANCIA	ADMITANCIA
1	3	21	0.150E-01	0.600E-01

 INFORMACION DE LOS VOLTAJES APLICADOS

NUMERO DE VOLTAJES APLICADOS = 1

LAS UNIDADES DE LAS CONSTANTES SON:

FK1 = FK2 = VOLTIOS
 FK3 = VOLTIOS/SEG
 ALFA1 = ALFA2 = 1/SEG
 FREQ = CICLOS/SEG
 PHASE = GRADOS

NO.	NODO	TIPO	FK1	TIEMPO INICIAL	TIEMPO FINAL
1	1	ESC	0.100E+04	0.000E+00	0.600E-01

 OPLICIONES PARA DATOS DE SALIDA

NUMERO DE VOLTAJES A IMPRIMIRSE = 3

COLUMNA NO.	NODO
3	1
4	2
	3

NUMERO DE CORRIENTES A IMPRIMIRSE = 1

COLUMNA NO.	NODO INC.	NODO FINAL
5	1	>1

NUMERO DE VOLTAJES A GRAFICARSE = 1

NODO
3

NUMERO DE CORRIENTES A GRAFICARSE = 1

NODO INC.	NODO FINAL
3	21

FIGURA 5.3.3. IMPRESION DE DATOS DE ENTRADA

$$R = 1.0 \times 10^{-20} \Omega \quad \text{Fig.5.3.4.}$$

$$R = 331.66 \Omega \quad \text{Fig.5.3.5.}$$

$$R = 663.32 \Omega \quad \text{Fig.5.3.6.}$$

$$R = 994.99 \Omega \quad \text{Fig.5.3.7.}$$

En la figura 5.3.8, se da la corriente en la unión inductor-capacitor (en amperios) en función del tiempo (en msec) para el caso de amortiguamiento crítico.

EJEMPLO 2

Para este ejemplo se usó el sistema de la figura 5.3.9, los resultados se obtuvieron en base a un Intervalo de Integración $\Delta t = 0.08$ msec.

Datos de las Líneas de Transmisión

Línea	Longitud (millas)	Inductancia (mH/milla)	Capacitancia (uF / milla)
1-2	100.0	2.10	0.014
2-3	49.1	3.67	0.00835
3-4	24.8	2.08	0.0142
2-5	100.0	2.10	0.014

Todas las líneas se consideran sin pérdidas.

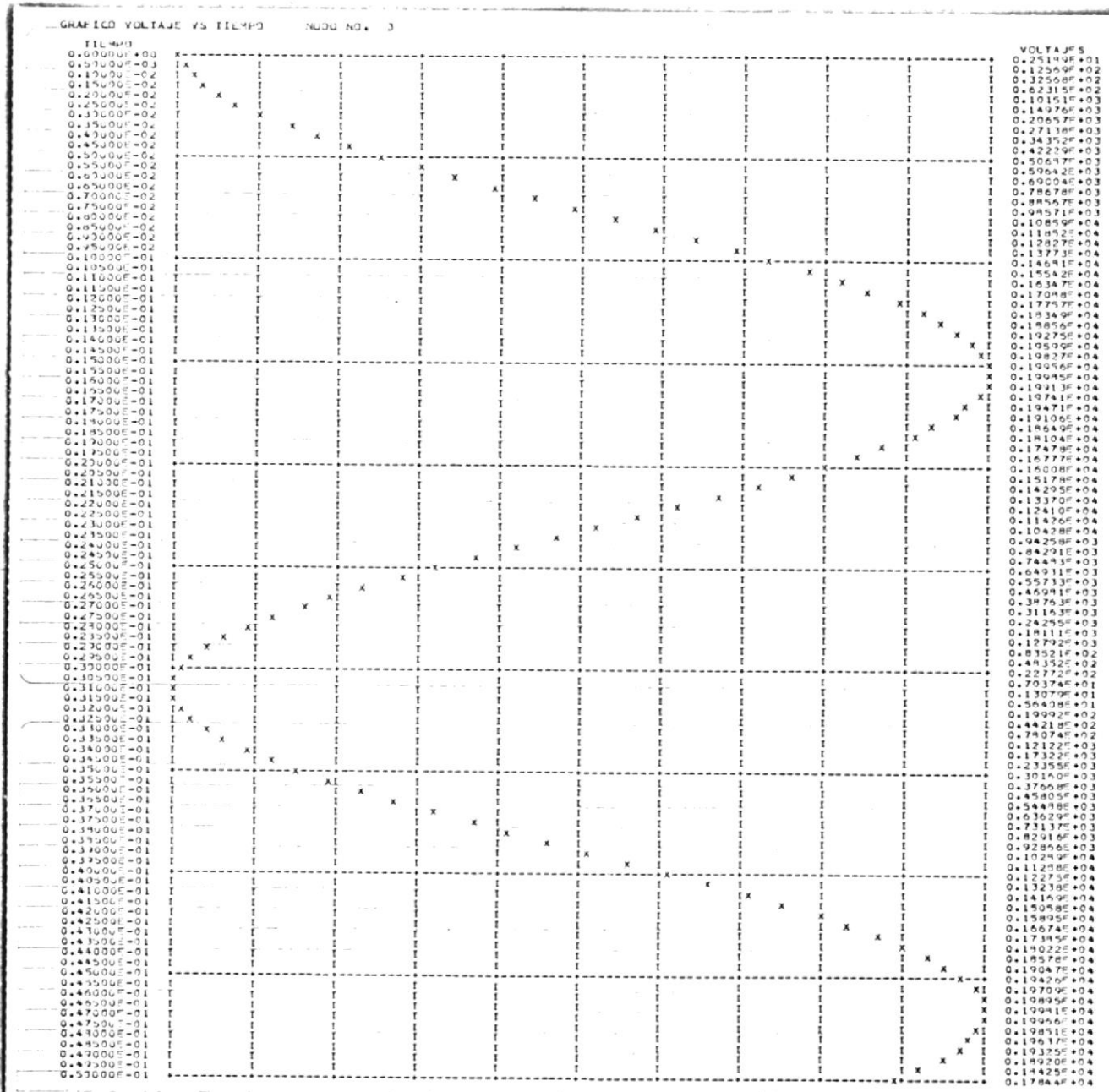


FIGURA 5.3.4. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N° 3

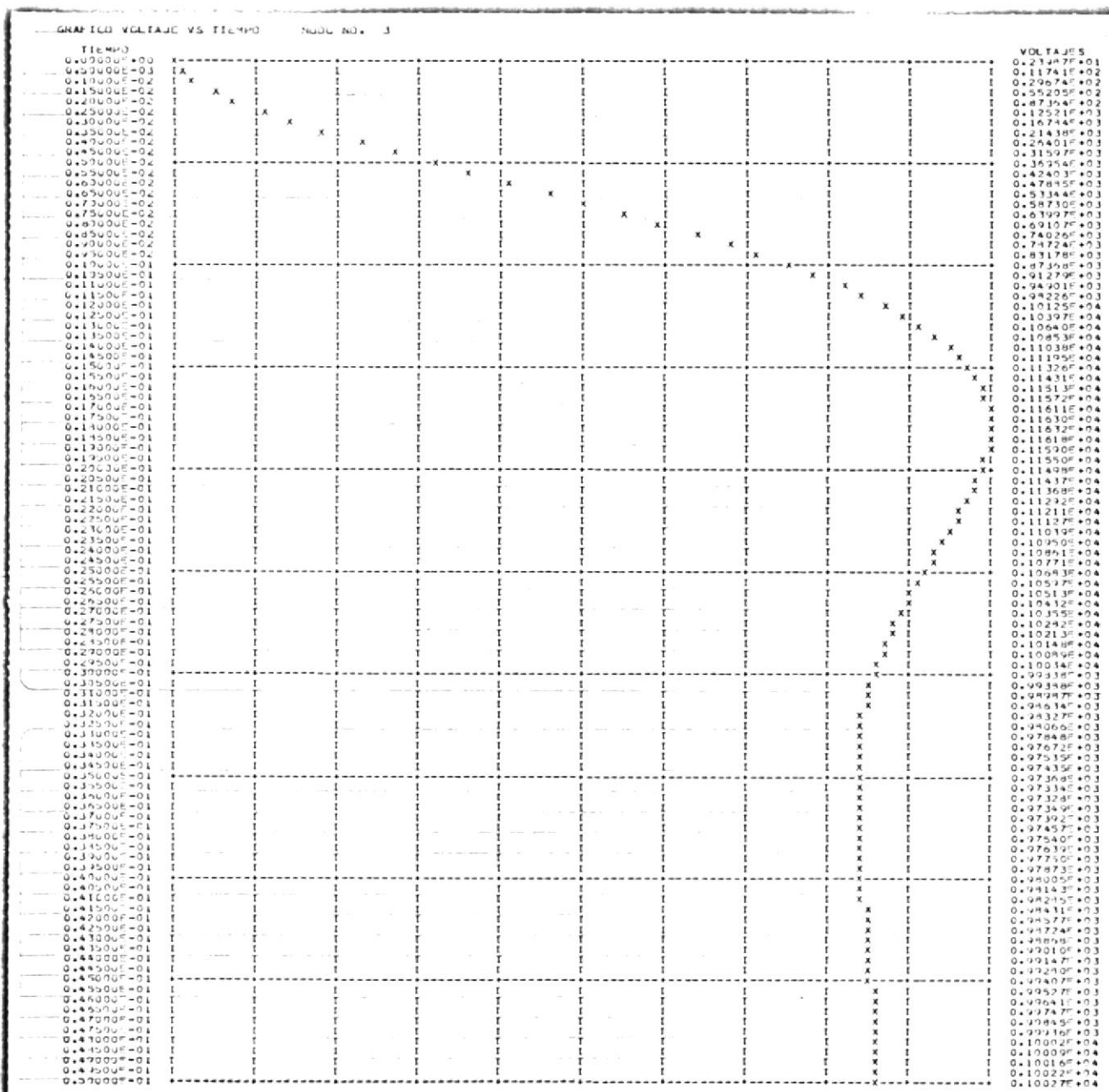


FIGURA 5.3.5. GRAFICO VOLTAJE VS. TIEMPO NODO N° 3



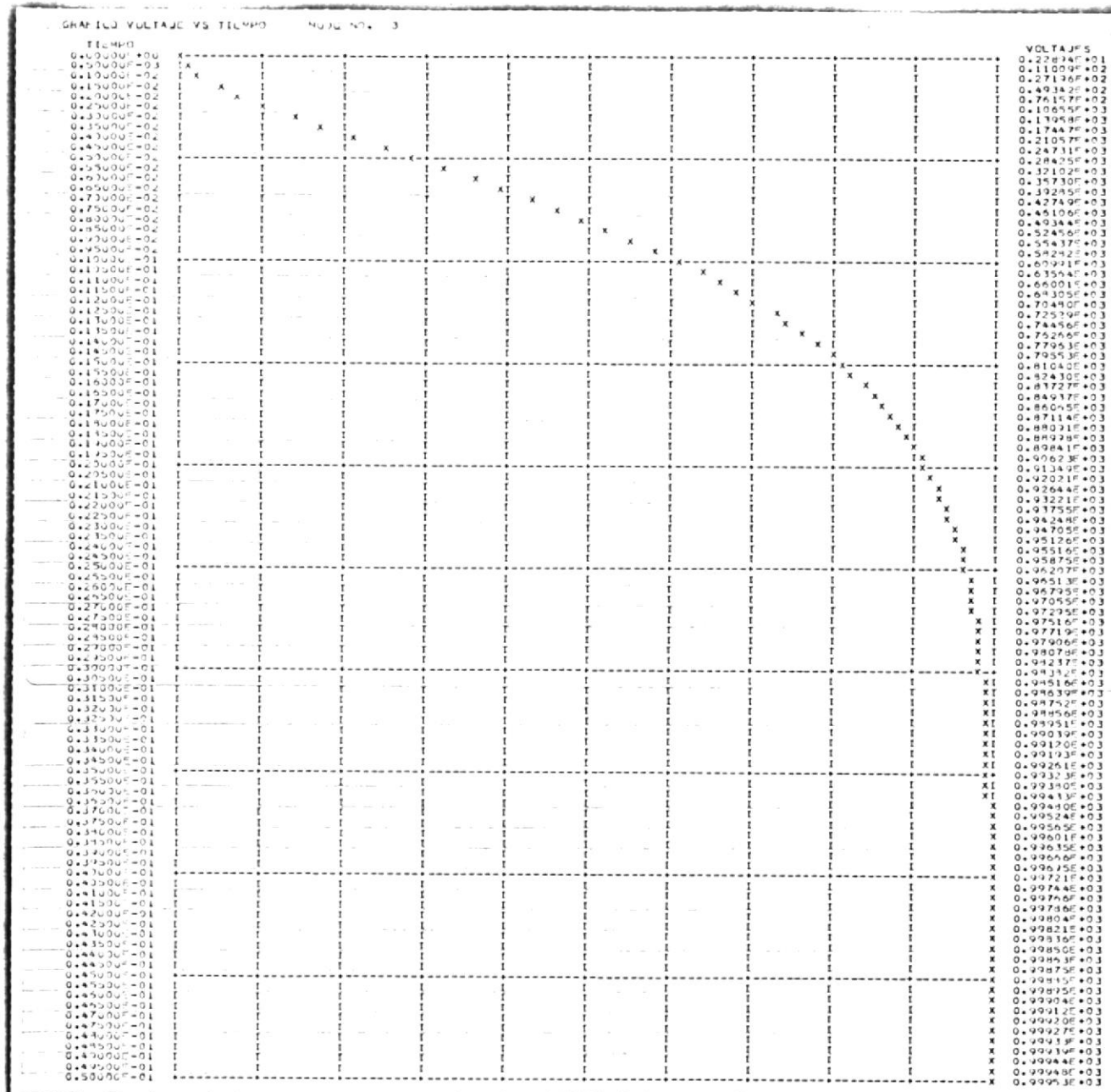


FIGURA 5.3.6. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N° 3

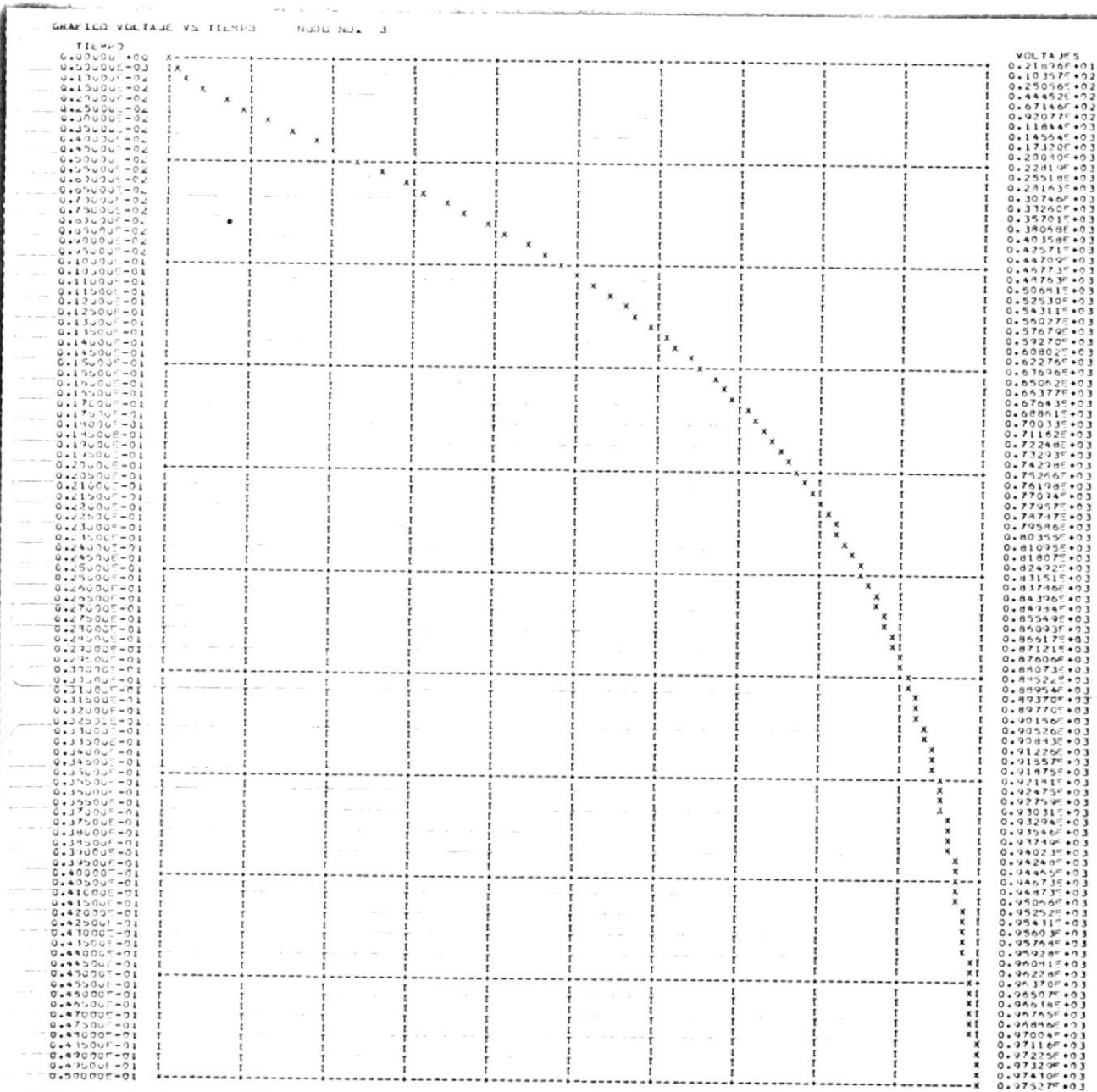


FIGURA 5.3.7. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N° 3

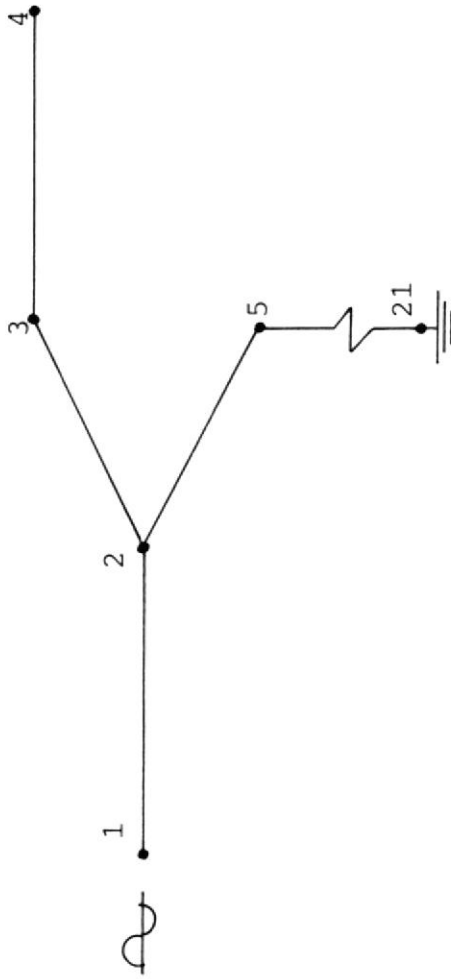


FIGURA 5.3.9. SISTEMA MONOFASICO RADIAL

Terminación en 5

Resistor lineal, no inductivo de 500 ohms.

Alimentación

Sinusoide aplicada al tiempo cero.

Voltaje pico de 1 Kv ocurriendo al tiempo cero.

Frecuencia de alimentación - 50 ciclos/seg.

Impedancia de la fuente - cero.

Los gráficos de los voltajes (en voltios), de los 5 nodos, en función del tiempo (en mseg) se dan en las figuras 5.3.10 a 5.3.14.

EJEMPLO 3

La figura 5.3.16, muestra el resultado de aplicar una onda escalón unitario a la red LC tipo escalera de la figura 5.3.15, los voltajes están en p.u. y el tiempo en mseg.

Se usaron los siguientes valores:

$$L = 0.2 \text{ mH}$$

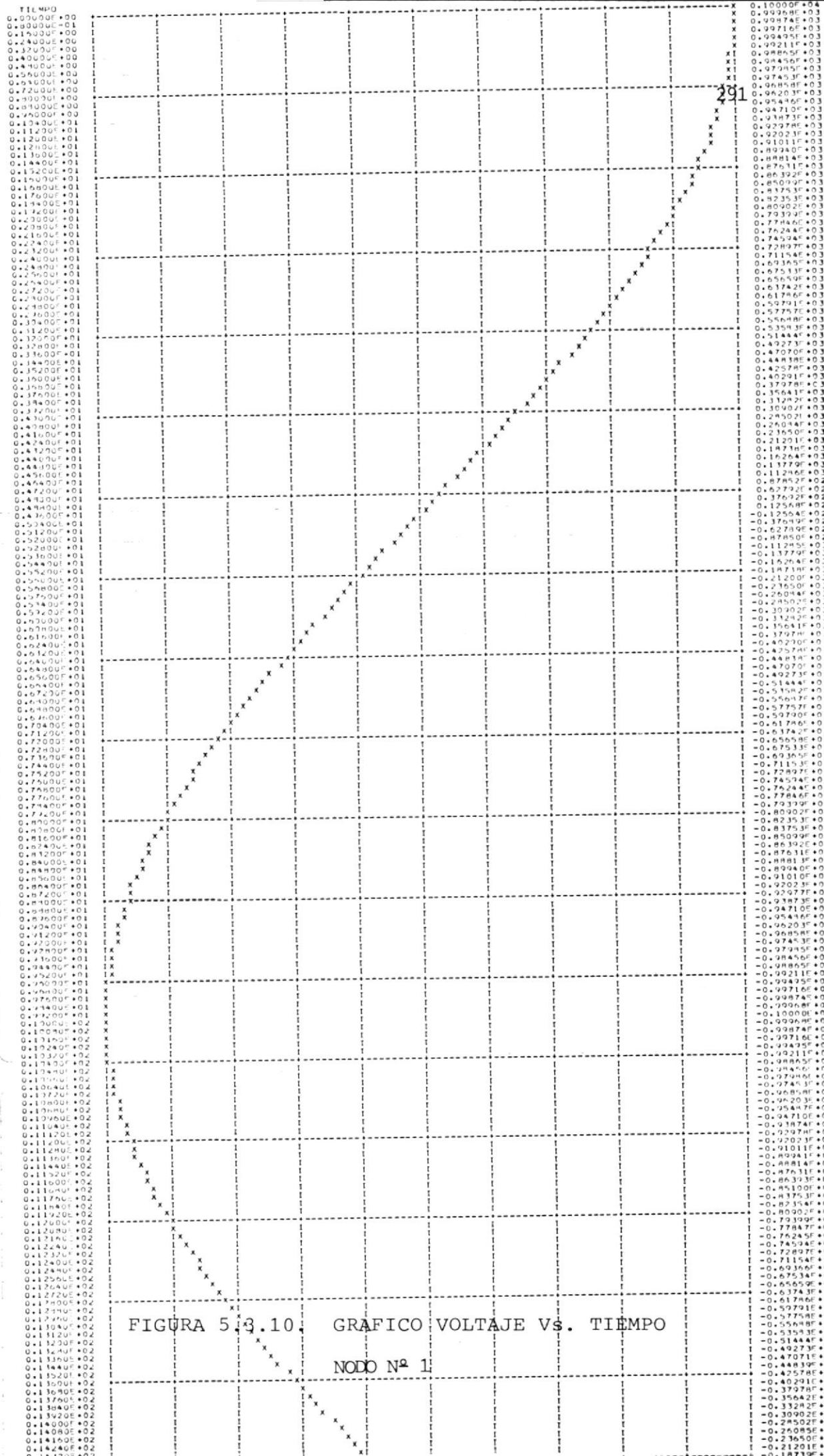


FIGURA 5.3.10. GRAFICO VOLTAJE VS. TIEMPO

NODO N° 1

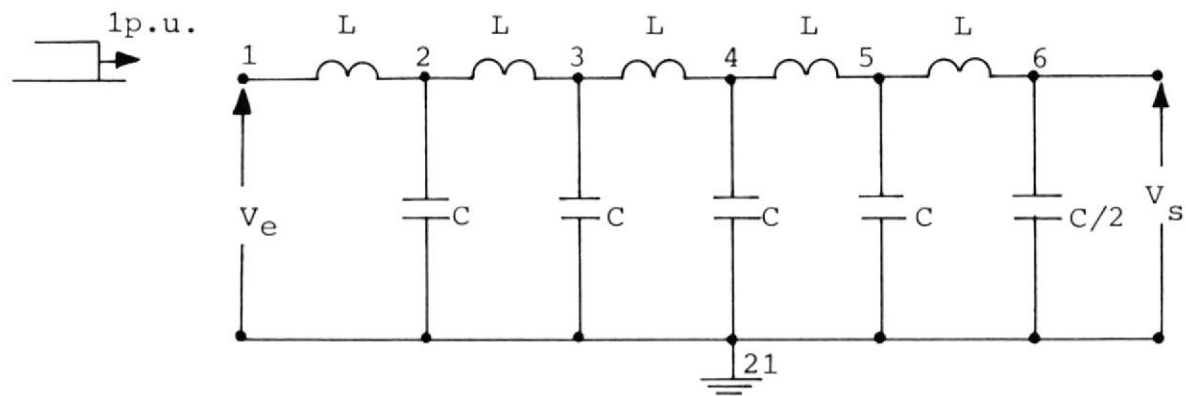


FIGURA 5.3.15. RED LC TIPO ESCALERA

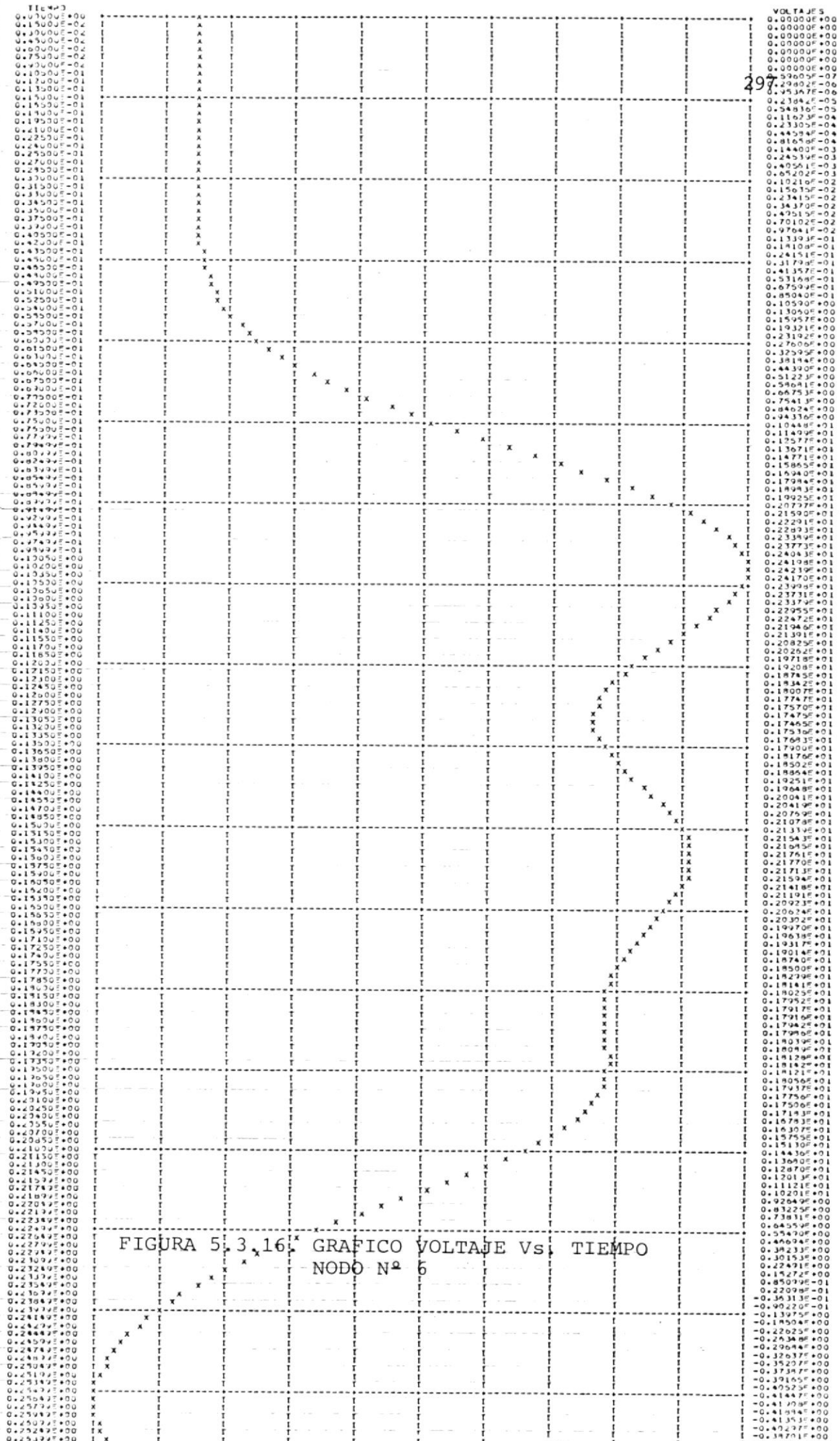


FIGURA 5.3.16. GRAFICO VOLTAGE VS. TIEMPO
NODO N° 6

$$C = 1.0 \text{ uF}$$

$$\Delta t = 0.15 \times 10^{-2} \text{ mseg}$$

EJEMPLO 4

En la figura 5.3.17, se muestra una línea de transmisión con carga R-L serie, la línea tiene una longitud de 100 millas y se energiza con una onda escalón de magnitud 1Kv al tiempo $t=0$.

Usando un Intervalo de Integración $\Delta t = 0.03125\text{mseg}$, los gráficos del voltaje (en voltios) y la corriente (en amperios) en función del tiempo (en mseg), para el terminal de recepción de la línea, son los datos en las figuras 5.3.18 y 5.3.19.

EJEMPLO 5

Es posible obtener el voltaje o la corriente en puntos intermedios a los extremos de recepción y envío de una línea de transmisión, para esto se hace necesaria la creación de nodos artificiales.

Considérese la línea mostrada en la figura 5.3.20 ,

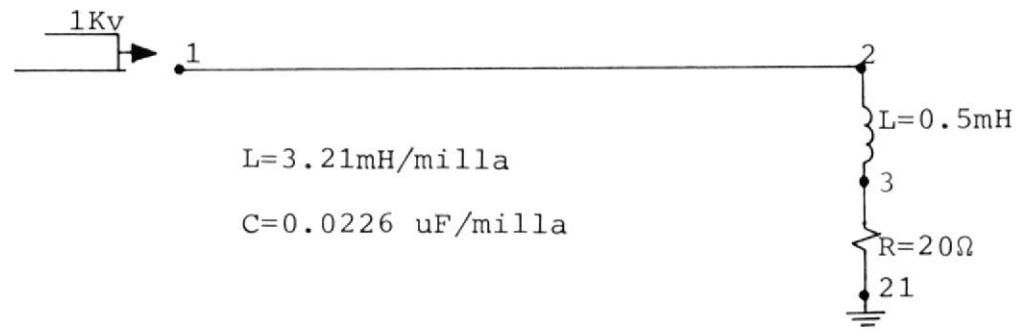


FIGURA 5.3.17. LINEA CON CARGA R-L SERIE.

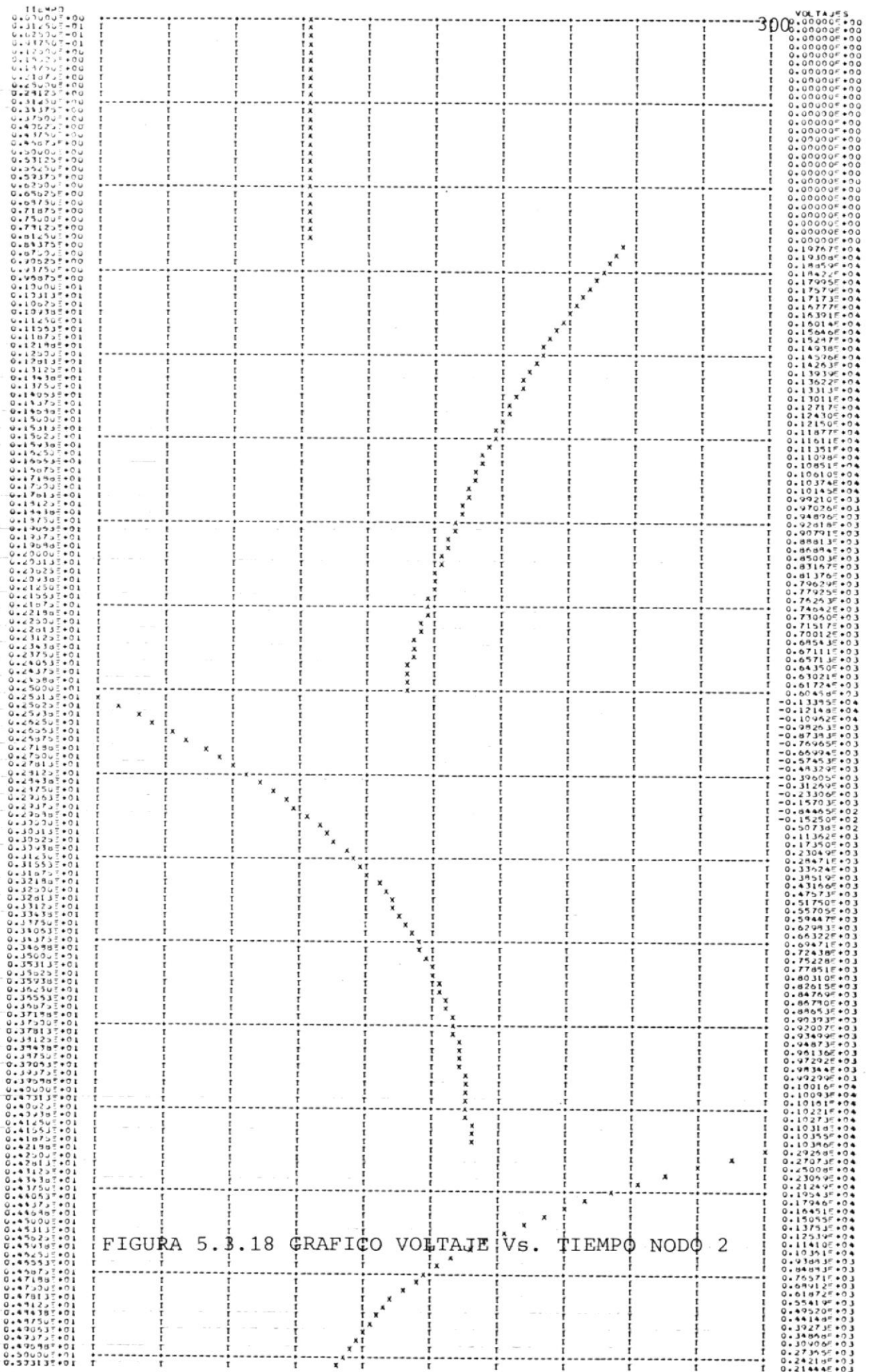


FIGURA 5.3.18 GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO 2

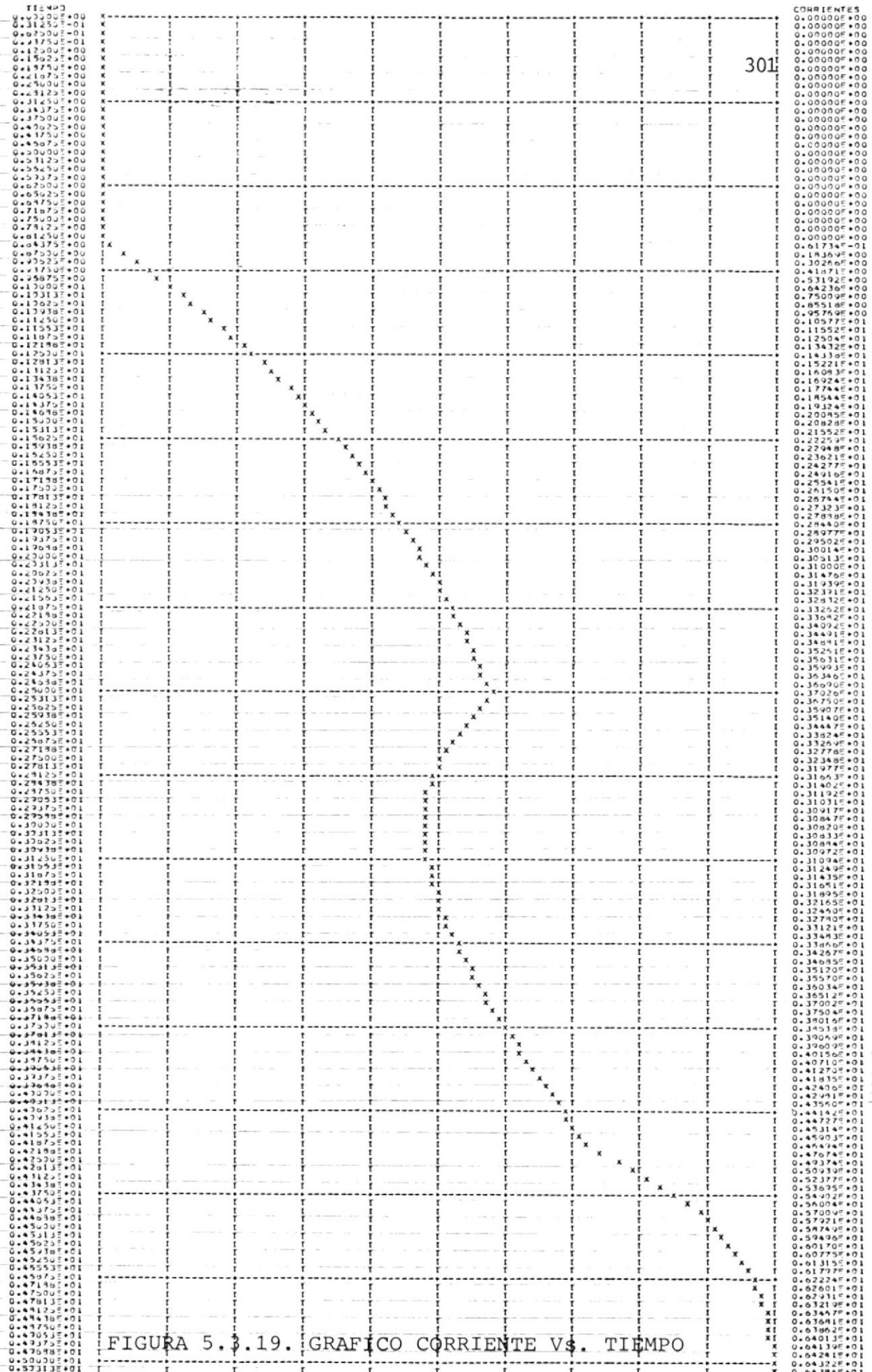


FIGURA 5.3.19. GRAFICO CORRIENTE VS. TIEMPO

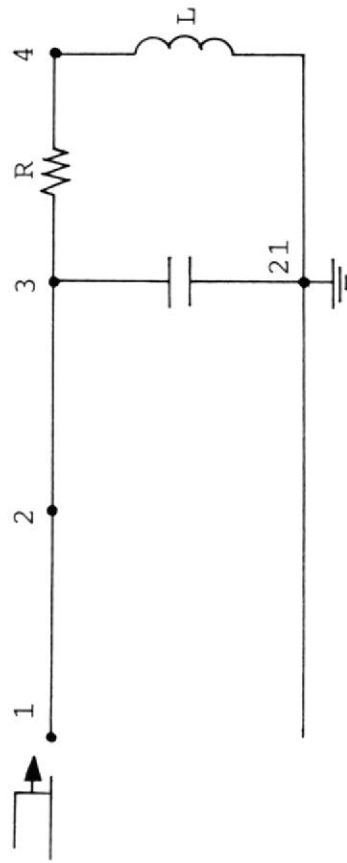


FIGURA 5.3.20. LINEA MONOFASICA CON CARGA R-L SERIE, C PARALELO

El extremo de recepción es el nodo 3 y el de envío es el nodo 1, la línea tiene una longitud de 50 millas y se quiere determinar el voltaje en su punto medio y en el extremo de recepción. Para obtener el voltaje en el punto medio se divide la línea 1, 3 en las líneas 1,2 y 2,3 con el nodo 2 (nodo artificial) a 25 millas del extremo de recepción.

Es decir, las líneas 1,2 y 2,3 tienen la misma inductancia y capacitancia por milla que la línea 1, 3 pero cada una de ellas tiene una longitud de 25 - millas.

Los datos son los siguientes:

<u>Línea</u>	<u>Alimentación</u>
L = 3.21 mH/milla	Onda escalón
C = 2.26×10^{-2} uF/milla	Magnitud = 100 Kv
Longitud = 50 millas	Aplicada al tiempo
	t=0

Elementos concentrados

$$R = 13.9 \Omega$$

$$L = 0.468 \text{ H}$$

$$C = 10^{-9} \text{ F}$$

Usando un Intervalo de Integración $\Delta t = 0.01$ mseg, los gráficos de voltaje (en voltios) en función del tiempo (en mseg), para los nodos 2 y 3, son los dados en las figuras 5.3.21 y 5.3.22.

EJEMPLO 6

Para este ejemplo se tomó la red monofásica enmallada de la figura 3.3.1., la cual por comodidad se repite en la figura 5.3.23.

Los valores de inductancia y capacitancia por milla usados para todas las líneas son:

$$L = 0.133 \text{ mH/milla}$$

$$C = 0.833 \times 10^{-3} \text{ uF/milla}$$

Todas las líneas tienen una longitud de 30 millas, a excepción de la línea 2,3 que tiene una longitud de 60 millas. Con el objeto de simular una descarga atmosférica en el nodo 3, se usó una onda de impulso con un tiempo de frente $t_1 = 2$ useg, un tiempo de cola $t_2 = 50$ useg y con un valor pico de 1.0 p.u.

Según se explica en el Apéndice C, una onda de este

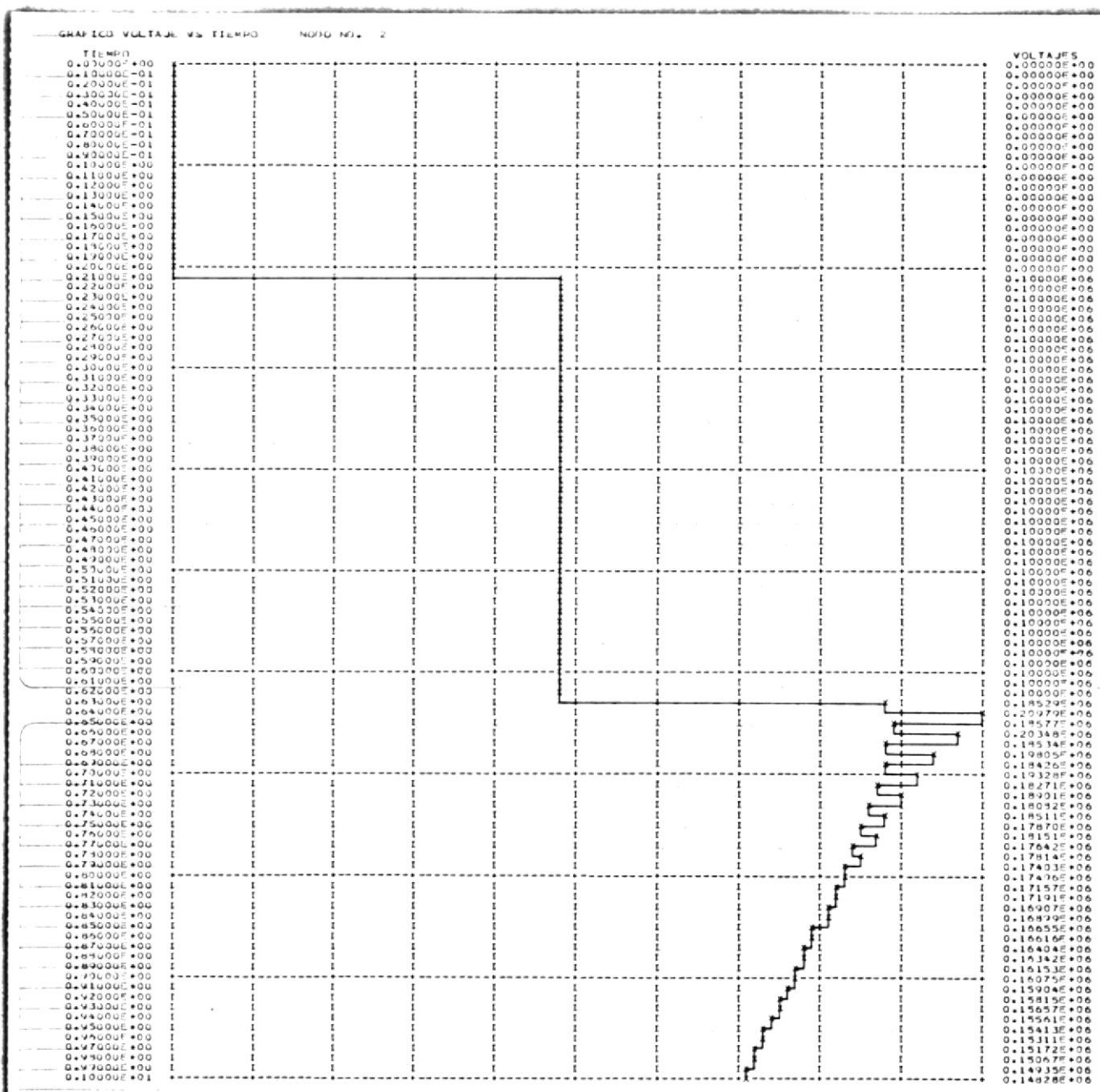


FIGURA 5.3.21. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N° 2

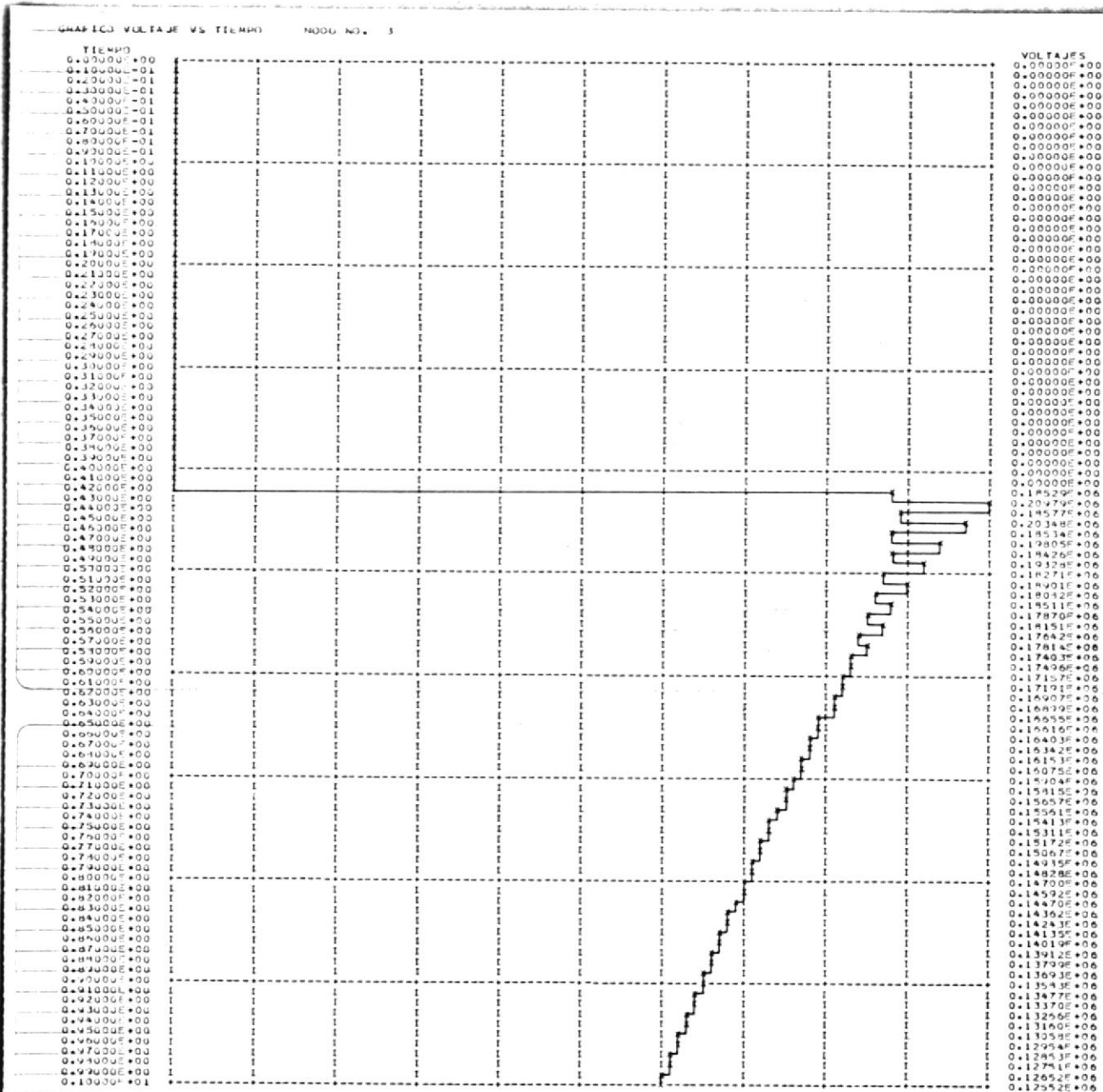


FIGURA 5.3.22. GRAFICO VOLTAJE Vs. TIEMPO NODO N.º 3

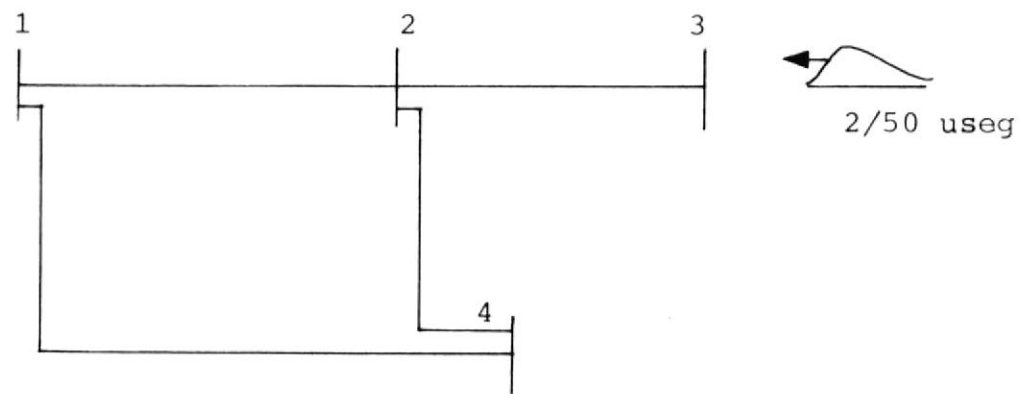


FIGURA 5.3.23. RED MONOFASICA ENMALLADA

tipo se la puede obtener por medio de la ecuación:

$$V(t) = E(e^{-at} - e^{-bt})$$

Para una onda de 2/50 useg, los valores adecuados de las constantes son:

$$E = 1.036 \text{ p.u.}$$

$$a = 0.146 \times 10^5 \text{ seg}^{-1}$$

$$b = 0.256 \times 10^7 \text{ seg}^{-1}$$

Usando un intervalo de Integración $\Delta t = 0.001$ msec, los gráficos de voltaje (en p.u.) en función del tiempo (en msec) para los nodos 1, 2 y 3 son los dados en las figuras 5.3.24 a 5.3.26, el gráfico de voltaje para el nodo 4 es igual al del nodo 1.

Es posible simular la descarga en puntos intermedios de una línea, para esto sería necesaria la creación de nodos artificiales de una manera similar a lo explicado en el ejemplo 5.

5.4. ANALISIS DE RESULTADOS

La mayoría de los ejemplos anteriormente expuestos

se tomaron de informes internacionales en los cuales se detallan los resultados correctos para cada problema, se comprobó que los resultados obtenidos concuerdan con los resultados de dichos informes.

Los ejemplos 1 y 3 nos muestran la facilidad con la cual el Método de Bergerón maneja los elementos concentrados, además resulta evidente que este método no está limitado a la solución de problemas transientes en sistemas de potencia sino que es posible usarlo para resolver problemas transientes en circuitos elementales.

Los resultados obtenidos en el Ejemplo 2 se comprobaron con los dados por Arlet & Murray - Shelley en su informe "Transientes en Líneas de Transmisión usando una Computadora Digital", las curvas de las figuras 5.3.10 a 5.3.14, muestran una aproximación bastante satisfactoria a las curvas mostradas en el informe anteriormente mencionado; las diferencias se presentan debido a que en el presente trabajo la graficación se la hace de una manera discreta mientras que Arlet & Murray-Shelley disponen de un graficador continuo.

En el ejemplo 5 se sugiere la manera de obtener los voltajes o corrientes para puntos intermedios de las líneas de transmisión.

La figura 5.3.21, muestra el voltaje en el punto medio de la línea, luego de 210 useg la onda viajera inicial llega al punto medio y puesto que la impedancia de sobretensión directamente frente a la onda viajera es la misma que inmediatamente atrás de ella, el voltaje se eleva en ese punto a 100 Kv (magnitud de la sobretensión). El voltaje en este punto permanece constante e igual a 100 Kv hasta que la onda reflejada desde la carga regresa al punto medio luego de $210 \times 3 = 630$ useg. De esta manera queda demostrado que el voltaje - visto por un observador, viajando en el frente de la onda que se propaga, cambia de valor y dirección solamente si el observador vé un cambio en la impedancia de sobretensión. Finalmente el voltaje decrece por efecto de la carga que actúa como un drenaje del voltaje que llega al extremo de recepción.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a la teoría desarrollada sobre el Método de Ondas Viajeras y el Método de Bergerón, se han elaborado programas de computación que permiten efectuar cálculos de sobretensiones en sistemas monofásicos.

La efectividad de los programas desarrollados ha sido comprobada mediante algunos ejemplos de aplicación a casos particulares, los que permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- El trabajo requerido para la reducción del sistema bajo estudio a líneas finitas, semi-infinitas y coeficientes de transferencia, necesaria para la aplicación del programa basado en el Método de Ondas Viajeras, es bastante más laborioso que aquel que se requiere para la representación por cuadripolos en la aplicación del programa basado en el Método de Bergerón.
- El Método de Bergerón permite la formulación directa para cada tipo de elemento, ya que parte de las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento eléctrico de cada uno de ellos.

- Los ejemplos resueltos y los programas desarrollados permiten señalar que el método de Bergerón a más de ser un método bastante preciso, es el más adecuado para enfocar situaciones más complejas a las estudiadas en este trabajo.

- Tanto en el Método de Bergerón como en el Método de Ondas Viajeras, la elección adecuada del Intervalo de Integración y del Intervalo Básico de Tiempo, respectivamente, es de fundamental importancia en la precisión de los resultados, principalmente cuando existen elementos concentrados.

El autor de esta tesis espera que los programas elaborados y sus resultados sirvan de ayuda para que en la ESPOL se continúe con la investigación del uso de un computador digital en el estudio de las sobretensiones, sin embargo, se reconoce que el trabajo efectuado es apenas una introducción, ya que un proyecto de esta naturaleza no puede decirse que está completo hasta que se disponga de un programa para redes trifásicas y que trabaje para cualquier configuración del sistema, para este fin se recomienda lo siguiente:

- Cuando en el sistema existen elementos no lineales, es

conveniente aplicar superposición, según se explica en el Apéndice D: "Consideración de Elementos No Lineales en el Método de Bergerón".

- En el caso de redes trifásicas, se hace necesario recurrir a la transformación modal, según se explica en el Apéndice E: "Sobretensiones en Redes Trifásicas: Transformación Modal".

- En los problemas que involucran redes trifásicas, se presenta el inconveniente de manejar computacionalmente matrices de gran dimensión y dispersas. Esto conduce a la necesidad de adoptar técnicas especiales. Como ordenamiento y almacenamiento óptimos.

- No es conveniente usar la transformación modal en el tratamiento de resistencias trifásicas, ya que la matriz de resistencias transformada resulta llena, lo cual significa que las ecuaciones en el dominio modal quedan acopladas.

Sin embargo, en el caso particular en que las resistencias en las tres fases son iguales ($R_a = R_b = R_c = R$), dichas ecuaciones pueden desacoplarse por medio del uso de la transformación modal.

- En el estudio de líneas trifásicas con cierre secuen
cial, no es conveniente el uso de la transformación mo
dal, puesto que las resistencias que simulan el cierre
toman valores diferentes por fase y las ondas que via
jan por las fases del sistema trifásico no se encuen-
tran en la misma posición en un instante determinado -
 t_0 , lo cual obliga a realizar los cálculos directamen-
te en componentes de fase.

A P E N D I C E S

APENDICE A

COMPORTAMIENTO DE ONDAS VIAJERAS EN LAS TERMINACIONES DE LINEAS

Según se mencionó en el Capítulo II, a más de las discontinuidades que se presentan en las uniones de dos o más líneas con diferentes impedancias características; se tienen las discontinuidades que existen en las terminaciones de líneas, las cuales comprenden desde el cortocircuito hasta el circuito abierto. Se considerarán en primer lugar estos dos casos extremos y luego las terminaciones - en general.

a. Cortocircuito. Es imposible que exista un voltaje a través de un cortocircuito, de manera que cuando una onda viajera de voltaje llega a éste, la onda reflejada de voltaje debe cancelar, exactamente, a la onda incidente para que la onda refractada sea cero. Si la onda incidente de voltaje es e_1 y la onda incidente de corriente es i_1 , la onda reflejada de voltaje será $-e_1$ y la onda reflejada de corriente será $+i_2(=i_1)$, y la onda reflejada de corriente será $+i_2(=i_1)$, esto se ilustra en la figura A.1.

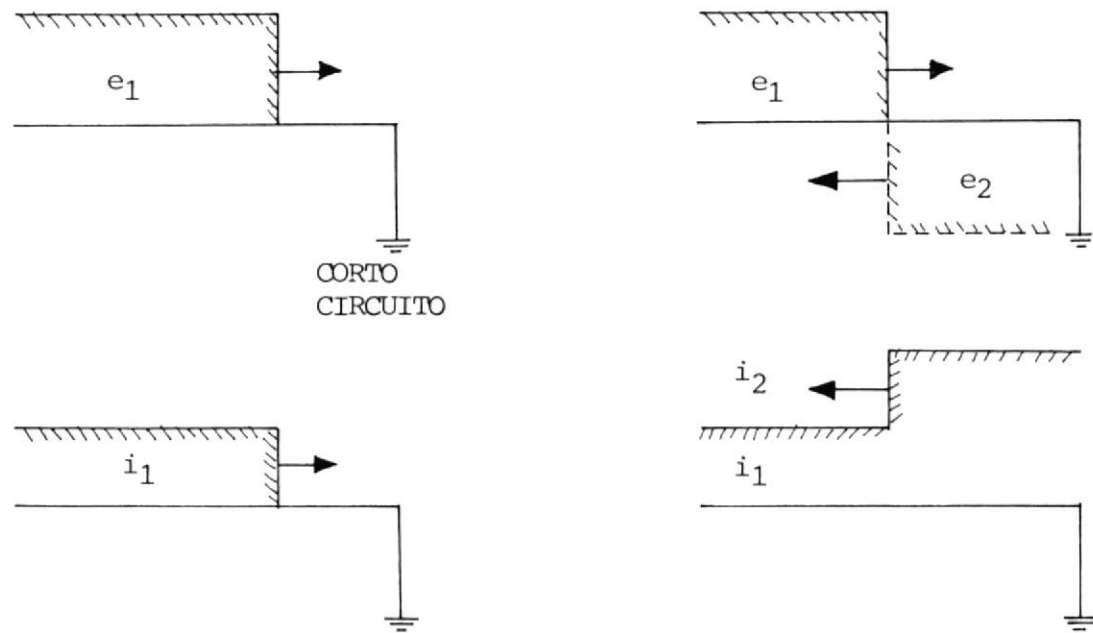


FIGURA A.1: REFLEXION DE ONDAS VIAJERAS DESDE UN CORTOCIRCUITO

La onda reflejada de voltaje aniquila a la onda incidente conforme viaja hacia atrás, mientras que la onda reflejada de corriente aumenta a la onda incidente, doblando la corriente que fluye en la línea.

El fenómeno puede visualizarse en términos de energía; se demostró en el Capítulo II que la energía que se imparte a la línea, por una onda, conforme ésta viaja a lo largo de ella, se almacena la mitad en el campo eléctrico, en la capacitancia de la línea, y la otra mitad en el campo magnético, en la inductancia de la línea.

Cuando la onda incidente de voltaje se refleja, desde el cortocircuito, forzando a cero el voltaje de la línea, se libera la energía eléctrica. En ausencia de cualquier mecanismo de pérdidas, esta energía no puede ser disipada y por lo tanto se transforma en energía magnética. El campo magnético debe entonces almacenar la energía tanto de la onda incidente como la de la onda reflejada, de aquí que la corriente aumente su magnitud al doble y la energía almacenada en el campo magnético sea cuatro veces mayor (la energía es proporcional a i^2).

Examinémos ahora lo que sucede cuando se aplica un -

cortocircuito a una línea alimentada por una fuente de voltaje, la cual, por simplicidad, asumimos que tiene una impedancia interna nula y que proporciona un voltaje constante E . Debemos tener en cuenta - que en el cortocircuito el voltaje siempre es igual a cero, mientras que en la fuente siempre es igual a E . Para satisfacer la primera de éstas condiciones, cuando se aplica el cortocircuito, una onda de voltaje de amplitud $-E$ viaja hacia la fuente, reduciendo a cero el voltaje de la línea. Puesto que esta onda viaja en la dirección negativa de x , la onda de corriente que la acompaña es $+E/Z$, esto se ilustra en la figura A.2.a. Cuando esta onda llega a la fuente, para satisfacer la segunda condición, debe iniciarse una nueva onda de voltaje de magnitud $+E$, la cual, debido a su dirección, es acompañada por una onda de corriente $+E/Z$, según se observa en la figura A.2.b. Estas ondas siguen su curso hasta llegar al cortocircuito y el ciclo se repite (figura A.2.c.), de manera que la corriente de cortocircuito "vista" por la falla o por la fuente, se incrementa en pasos discretos de tiempo, según se aprecia en las figuras A.2.d y A.2.e. La fuente "siente" el efecto del cortocircuito γ unidades de tiempo posteriores a su aplicación, que es el tiempo que requiere la onda inicial para viajar desde -

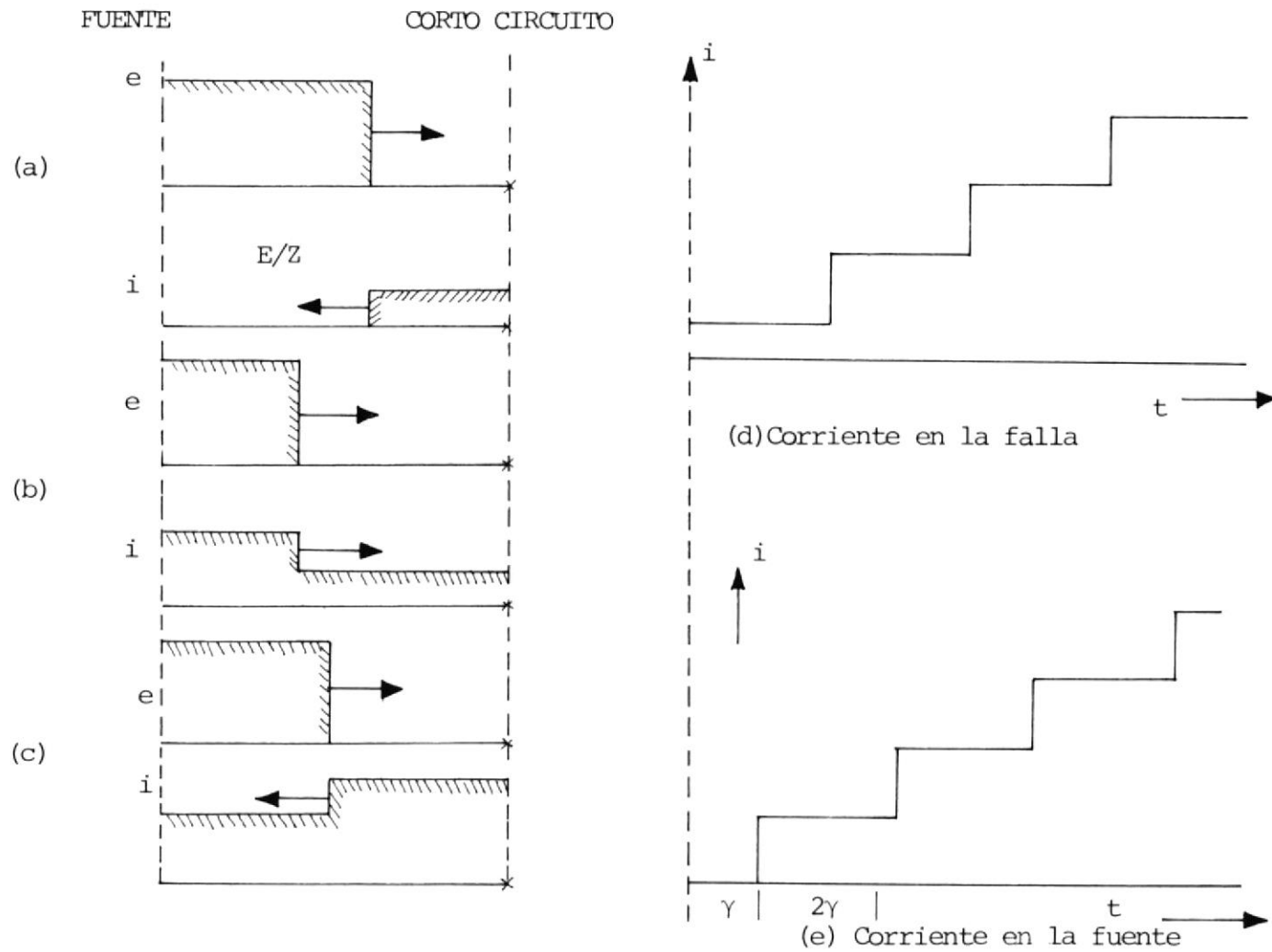


FIGURA A.2: INCREMENTO DE LA CORRIENTE CUANDO OCURRE UN CORTOCIRCUITO EN UNA LINEA DE TRNASMISION

el cortocircuito hasta la fuente, de allí en adelante la corriente se incrementa en pasos de $2E/Z$ a intervalos de tiempo iguales a 2γ . Supongamos que la línea tiene una capacitancia de C faradios/metro, luego la corriente se incrementa en pasos de $2E(C/L)^{1/2}$ cada $2\gamma = 2l(C/L)^{1/2}$ segundos, donde l es la distancia al punto en el cual ocurre la falla. Por lo tanto el incremento promedio de la corriente será:

$$2E(C/L)^{1/2} \frac{1}{2l(C/L)^{1/2}} = E/lL$$

es decir, que si despreciamos la resistencia de la línea, la corriente de falla se incrementará indefinidamente a razón de E/lL , donde lL es la inductancia que se tiene a l metros del punto de falla.

En circuitos de corriente alterna, la fuente de voltaje varía con el tiempo. Esto afecta, lo descrito anteriormente, solamente en el hecho de que las ondas - que salen de la fuente deben ser tales que se mantenga la igualdad entre el voltaje de la línea y el voltaje instantáneo de la fuente. Entre éstos eventos - discretos, cuando las ondas llegan a la fuente desde

el cortocircuito, la fuente, por si misma, se encuentra generando continuamente ondas viajeras, en virtud de su voltaje variable con el tiempo.

- b. Circuito abierto. Un circuito abierto en el extremo de una línea de transmisión demanda que la corriente, en ése punto, sea cero todo el tiempo. Así, cuando una onda de corriente de $+I$ llega al circuito abierto, se inicia una onda de corriente de $-I$ para satisfacer esta condición, ésta viajará hacia la fuente en compañía de su onda de voltaje relacionada de magnitud $+E$. Una onda de corriente de $-I$ que incide en un circuito abierto, se refleja como $+I$ y está asociada con $-E$. Lo que sucede cuando una línea en circuito abierto se energiza con una fuente de E voltios se muestra en la figura A.3.

En ésta situación, desaparece la energía magnética asociada con la corriente, cuando ésta se hace cero en el circuito abierto. Esta energía reaparece como energía eléctrica, lo cual se manifiesta aumentando el voltaje al doble de su valor anterior. Si el tiempo de tránsito para una onda que viaja a lo largo de la línea es de γ segundos, cuando las ondas iniciales de corriente y voltaje lleguen al terminal remoto, la fuente habrá proporcionado a la línea una cantidad

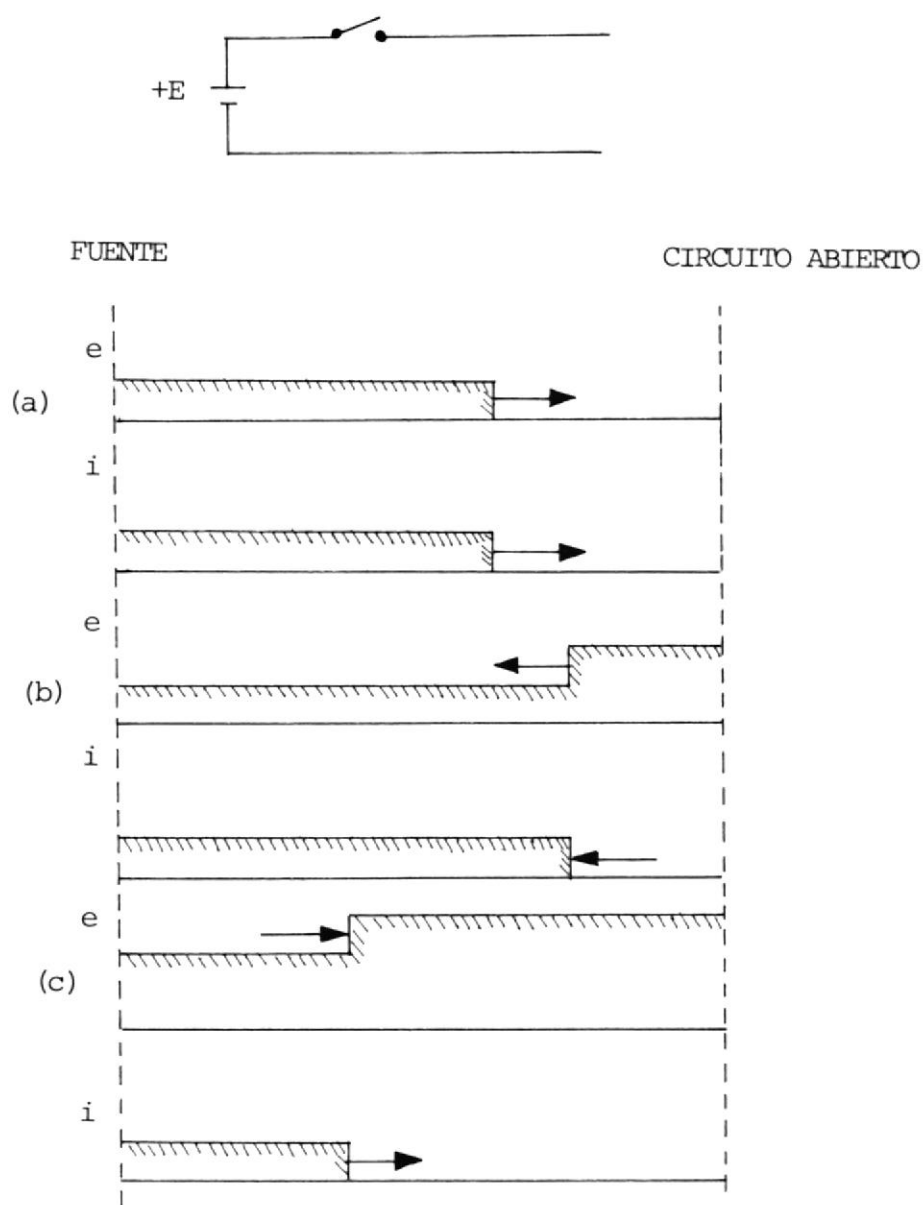


FIGURA A.3. ONDAS VIAJERAS OCASIONADAS POR LA ENERGIZACION DE UNA LINEA EN CIRCUITO ABIERTO.

de energía de $EI\gamma$ joules, la mitad de ésta se almacenará en el campo eléctrico y la otra mitad en el campo magnético, y segundos más tarde, $2EI\gamma$ joules se le habrán proporcionado a la línea, pero ahora toda ésta energía estará almacenada en el campo eléctrico.

Existe entonces en el campo eléctrico una energía 4 veces mayor que aquella que se tenía al tiempo γ , el voltaje de la línea debe ser entonces dos veces mayor, puesto que la energía varía directamente con el cuadrado del voltaje, estos sobrevoltajes pueden ser muy perjudiciales para el equipo terminal, si no se toman las medidas adecuadas; de aquí que el efecto de doblar el voltaje, descrito anteriormente, sea de mucha importancia práctica.

- c. Terminaciones Generales. La mayoría de las veces - las líneas de transmisión terminan en algún tipo de equipo, usualmente en uno o más transformadores. Para averiguar lo que sucede cuando las ondas viajeras llegan a estas terminaciones, debemos hacer uso de los coeficientes de reflexión y de refracción determinados en las ecuaciones 2.3.7, y 2.3.8, éstos se reproducen aquí por conveniencia:

$$\text{Coeficiente de reflexión} = K_r = (Z_B - Z_A) / (Z_B + Z_A) \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Coeficiente de refracción} = K_t = 2Z_B / (Z_B + Z_A) \quad (\text{A.2})$$

Las ondas viajan a lo largo de una línea de transmisión con impedancia de sobretensión Z_A e inciden en un equipo terminal, el cual tiene una impedancia Z_B , escribiremos estas cantidades como impedancias operacionales (haciendo uso de la transformada de Laplace), de manera que Z_A se comporta como un resistor, independiente de s , puesto que $Z_A = (Ls/Cs)^{1/2}$.

Supongamos ahora que el equipo terminal es un capacitor, luego:

$$Z_B(s) = 1/C_1s$$

y los coeficientes de reflexión y de refracción son:

$$K_r = \frac{1/C_1s - Z_A}{1/C_1s + Z_A} \quad (\text{A.3})$$

$$K_t = \frac{2/C_1 s}{1/C_1 s + Z_A} \quad (\text{A.4})$$

Si la onda viajera es una función escalón de amplitud E_1 , su transformada será $e_1(s) = E_1/s$. De manera que la transformada de la onda reflejada será:

$$e_2(s) = K_r e_1(s)$$

de donde, sustituyendo nos queda:

$$\begin{aligned} e_2(s) &= \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{1/C_1 s - Z_A}{1/C_1 s + Z_A} \right\} \\ &= \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{1/C_1 Z_A - s}{1/C_1 Z_A + s} \right\} \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Recordando que Z_A tiene dimensiones de resistencia, $C_1 Z_A$ es una constante de tiempo, en efecto, la constante de tiempo para cargar C_1 a través de la impedancia característica de la línea Z_A . Llamando

$$1/C_1 Z_A = \alpha$$

la ecuación A.5 puede reescribirse en la forma:

$$e_2(s) = E_1 \left\{ \frac{\alpha}{s(s+\alpha)} - \frac{1}{(s+\alpha)} \right\} \quad (\text{A.6})$$

Encontrando la transformada inversa de Laplace, se tiene:

$$\begin{aligned} E_2(t) &= E_1 \{ 1 - \exp(-\alpha t) - \exp(-\alpha t) \} \\ &= E_1 \{ 1 - 2\exp(-\alpha t) \} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Esta es la onda que viaja, de regreso, en la línea y se superpone a la onda incidente. Puesto que la suma de las ondas incidente y reflejada debe ser igual a la onda refractada, es evidente de la ecuación A.7 - que:

$$E_3(t) = E_1 \{ 2 - \exp(-\alpha t) \} \quad (\text{A.8})$$

Esto puede verificarse derivando E_3 a partir del coe

ficiente de refracción:

$$e_3(s) = K_t e_1(s)$$

$$e_3(s) = \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{2/C_1 s}{1/C_1 s + Z_A} \right\}$$

$$= \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{2\alpha}{s(s+\alpha)} \right\} \quad (\text{A.9})$$

La transformada inversa de la ecuación A.9, es idéntica a la expresión dada en la ecuación A.8. En este ejemplo Z_B no es una línea de transmisión sino una capacitancia; por lo tanto $E_3(t)$ no es una onda viajera - sino el voltaje que aparece a través del capacitor. - Tres instantes durante el proceso de reflexión se ilustran en las figuras A.4.a, A.4.b y A.4.c., la primera antes y las otras dos después de que la onda incidente llega a la terminación. Al igual que en las figuras anteriores, la línea llena representa la distribución neta de voltaje sobre la línea de transmisión en los instantes mostrados y la línea punteada - representa las ondas individuales, incidente y reflejada.

El perfil del voltaje, generado en el capacitor, $E_3(t)$,

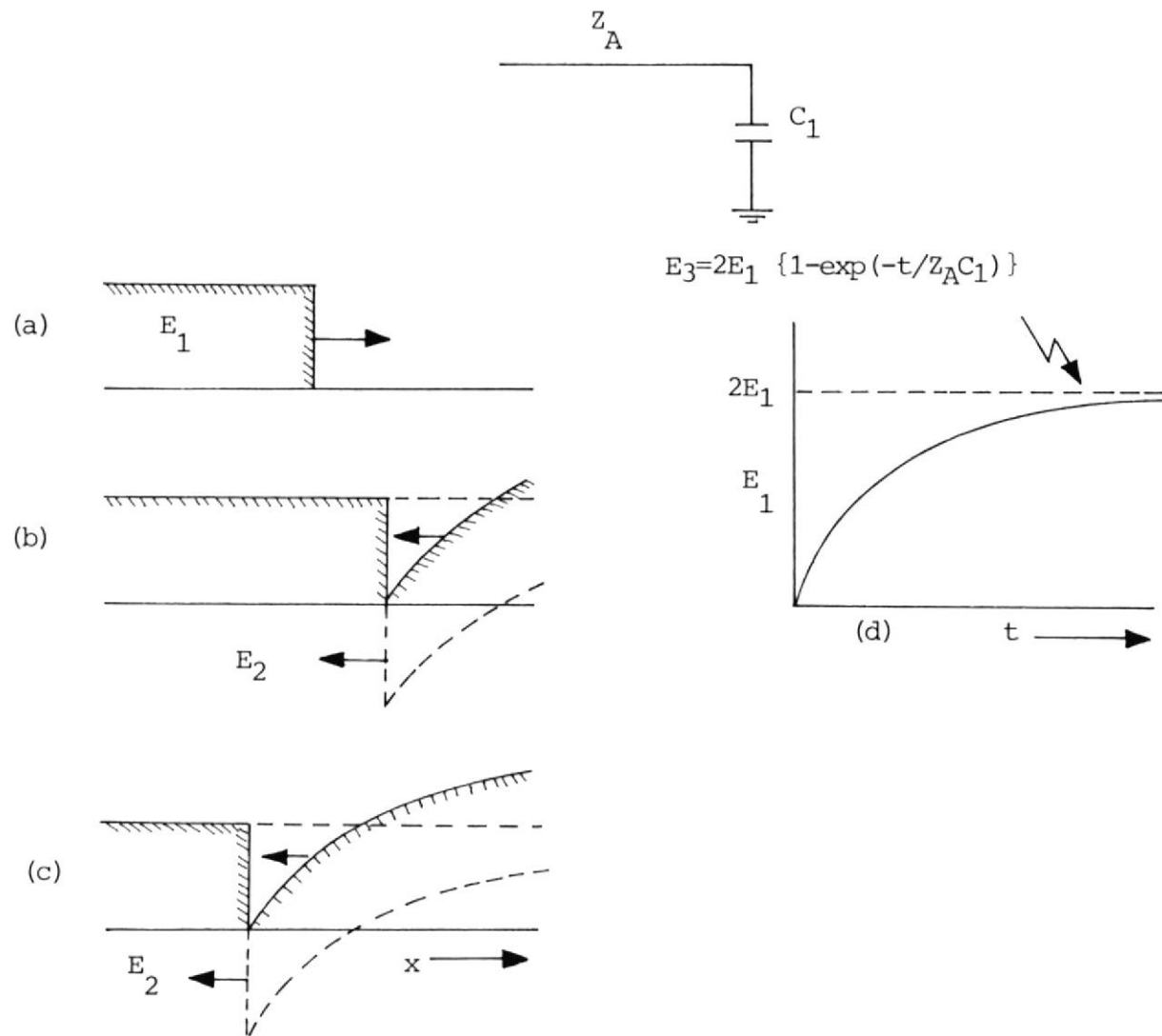


FIGURA A.4. ONDAS VIAJERAS EN UNA LINEA DE TRANSMISION CON TERMINACION CAPACITIVA. (a), (b) y (c) DISPOSICION DE LAS ONDAS EN INSTANTES DIFERENTES. (d) VOLTAJE TERMINAL DEL CAPACITOR, EN FUNCION DEL TIEMPO, POSTERIOR LA LLEGADA DE LAS ONDAS INICIALES.

se dibuja separadamente en la figura A.4.d, éste es de forma exponencial, comenzando en cero y aumentando hacia una asíntota de $2E_1$, con una constante de tiempo de $Z_A C_1$. Sin lugar a dudas, esto está de acuerdo con lo esperado desde un punto de vista físico, cuando la onda incidente llega al capacitor C_1 éste no puede cambiar instantáneamente su potencial. Momentáneamente, el capacitor se comporta como un cortocircuito; el frente de la onda reflejada cancela a la onda incidente al igual que ocurre en un cortocircuito. Finalmente, el capacitor no permite el paso de la corriente directa y en este aspecto se comporta como un circuito abierto, aumentando la magnitud del voltaje al doble de su valor original. El voltaje transiente satisface ambas condiciones, la inicial y la final, pasando de una hacia otra de una manera continua siguiendo la forma de la función exponencial.

La terminación inductiva es el dual de la capacitiva, en una inductancia la corriente no puede penetrar instantáneamente.

Cuando la onda llega a sus terminales, momentáneamente ésta se asemeja a un circuito abierto, pero -

puesto que una inductancia pura no presenta impedancia a la corriente directa, finalmente aparece como un cortocircuito. Si en las ecuaciones A.1 y A.2 - hacemos $Z_B = L_1 s$, obtenemos para las ondas reflejada y refractada:

$$e_2(s) = \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{L_1 s - Z_A}{L_1 s + Z_A} \right\} = \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{s - Z_A/L_1}{s + Z_A/L_1} \right\} \quad (\text{A.10})$$

$$e_3(s) = \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{2L_1 s}{L_1 s + Z_A} \right\} = \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{2s}{s + Z_A/L_1} \right\} \quad (\text{A.11})$$

Llamando a la constante de tiempo $1/\beta = L_1/Z_A$, tenemos:

$$e_2(s) = \frac{E_1}{s} \left\{ \frac{1}{s + \beta} - \frac{\beta}{s(s + \beta)} \right\} \quad (\text{A.12})$$

$$e_3(s) = E_1 \left\{ \frac{2}{s + \beta} \right\} \quad (\text{A.13})$$

La transformada inversa nos conduce a:

$$E_2(t) = -E_1 \{1 - 2 \exp(-\beta t)\} \quad (\text{A.14})$$

$$E_3(t) = 2E_1 \exp(-\beta t) \quad (\text{A.15})$$

Las ecuaciones A.14 y A.15 se ilustran en la figura A.5.

Existe un caso especial, el cual no ha sido analizado, supongamos que Z_B es una resistencia numericamente igual a la impedancia característica de la línea, es decir $Z_B = Z_A$, por lo que $K_r = 0$ y $K_t = 1$.

Esto significa que la onda incidente es completamente absorbida y no existe onda reflejada, lo cual es de poca importancia práctica en circuitos de potencia pero es muy importante en circuitos de comunicación y también en circuitos de medida.

Una terminación resistiva disipa energía, cuando una

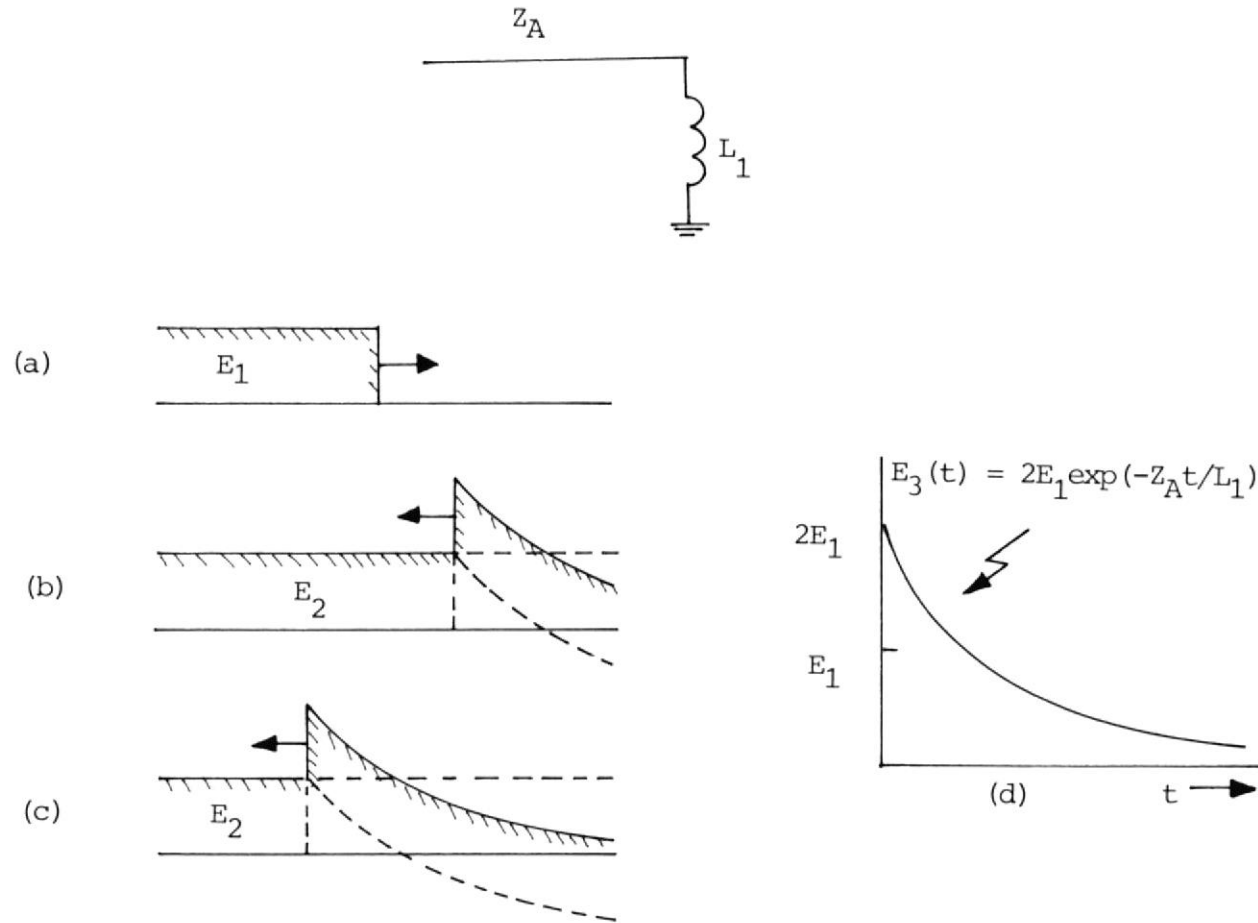


FIGURA A.5. ONDAS VIAJERAS EN UNA LINEA CON TERMINACION INDUCTIVA. (a), (b) y (c) DISPOSICION DE LAS ONDAS EN INSTANTES DIFERENTES. (d) VOLTAJE TERMINAL DEL INDUCTOR, EN FUNCION DEL TIEMPO, POSTERIOR A LA LLEGADA DE LAS ONDAS INICIALES

onda viajera llega a un resistor, la energía que no se absorbe se refleja.

En el caso especial, en el cual la resistencia terminal es igual a la impedancia característica de la línea, la onda proporciona energía a la terminación a una tasa tal que esta energía se disipa completamente, sin dejar nada para la reflexión.

APENDICE B

LINEAS CON PERDIDAS Y ELIMINACION DE NODOS INTERMEDIOS

Las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento de una línea de transmisión real, pueden obtenerse fácilmente en forma similar al caso de una línea ideal; sin embargo, la solución de estas ecuaciones no es inmediata por lo cual las pérdidas se consideran en forma aproximada.

Para el tratamiento de líneas con pérdidas se conserva el mismo esquema de cálculo que en el caso ideal. Las pérdidas se toman en cuenta seccionando la línea en tramos, que se consideran ideales, e intercalando entre ellos cuadripolos formados por resistencias.

Algunos estudios en este sentido han demostrado que se obtienen buenos resultados intercalando $R/2$ en el centro de la línea y $R/4$ en cada uno de sus extremos - (R es la resistencia serie total de la línea de transmisión), según se indica en la figura B.1.

Lo anterior involucra aumentar el número de nodos del

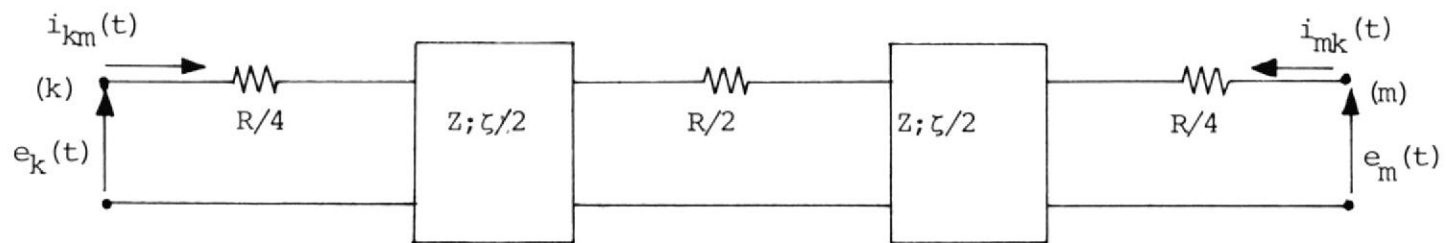


FIGURA B.1. MODELO PARA EL TRATAMIENTO APROXIMADO DE LINEAS CON RESISTENCIA EN SERIE

sistema eléctrico de potencia (4 nodos más por cada línea), sin embargo, los nodos intermedios que aparecen pueden ser eliminados empleando la técnica que a continuación se describe.

La forma de disminuir la dimensión de los arreglos en los programas de computación es eliminando nodos intermedios que no son de interés.

Se deducirán las expresiones a emplear, para hacer posible la eliminación de nodos intermedios, en algunos casos más comunes.

a. R - L Serie (Monofásico)

Por Kirchoff, se cumple que:

$$e_p(t) - e_n(t) = R \cdot i_{pq}(t) \quad (B.1)$$

$$e_n(t) - e_q(t) = L \cdot \frac{d}{dt} i_{pq}(t) \quad (B.2)$$

Despejando la corriente de la ecuación B.2, se tiene :

$$i_{pq}(t) = 1/L \int_{-\infty}^t \{e_n(t) - e_q(t)\} dt \quad (B.3)$$

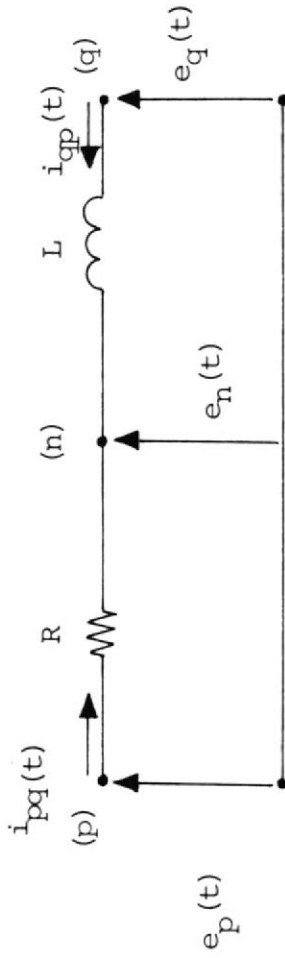


FIGURA B.2. RESISTOR E INDUCTOR EN SERIE

La ecuación B.3, se puede escribir en la forma:

$$i_{pq}(t) = i_{pq}(t-\Delta t) + 1/L \int_{t-\Delta t}^t \{ e_n(t) - e_q(t) \} dt \quad (B.4)$$

donde:

$$i_{pq}(t-\Delta t) = 1/L \int_{-\infty}^{t-\Delta t} \{ e_n(t) - e_q(t) \} dt \quad (B.5)$$

Aplicando la regla trapezoidal en la ecuación B.4:

$$i_{pq}(t) = i_{pq}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \{ e_n(t - \Delta t) - e_q(t - \Delta t) + e_n(t) - e_q(t) \} \quad (B.6)$$

Por otra parte, de la ecuación B.1., la tensión en el nodo (n) está dada por:

$$e_n(t) = e_p(t) - R \cdot i_{pq}(t) \quad (B.7)$$

Reemplazando la ecuación B.7, en la B.6 y ordenando, obtenemos:

$$i_{pq}(t) = \frac{1}{\frac{2L}{\Delta t} + R} \{ e_p(t) - e_q(t) \} + I_{pq}(t-\Delta t) \quad (\text{B.8})$$

Donde:

$$I_{pq}(t-\Delta t) = \frac{\frac{2L}{\Delta t} - R}{\frac{2L}{\Delta t} + R} i_{pq}(t-\Delta t) + \frac{1}{\frac{2L}{\Delta t} + R}$$

$$\{ e_p(t-\Delta t) - e_q(t-\Delta t) \} \quad (\text{B.9})$$

Con lo cual el circuito equivalente entre los nodos (p) y (q) para la conexión R-L serie resulta ser según se indica en la figura B.3, con $R_{eq} = R + 2L/\Delta t$.

b. R-C Serie (Monofásico)

Las ecuaciones de equilibrio para cada elemento son:

$$e_p(t) - e_n(t) = R \cdot i_{pq}(t) \quad (\text{B.10})$$

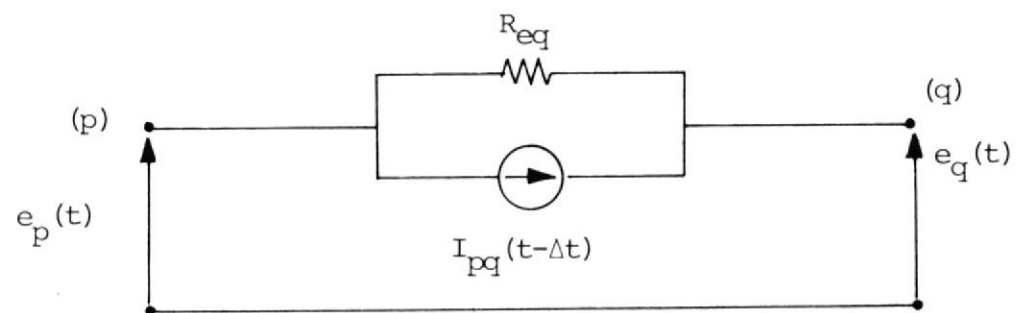


FIGURA B.3. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONEXION R-L SERIE

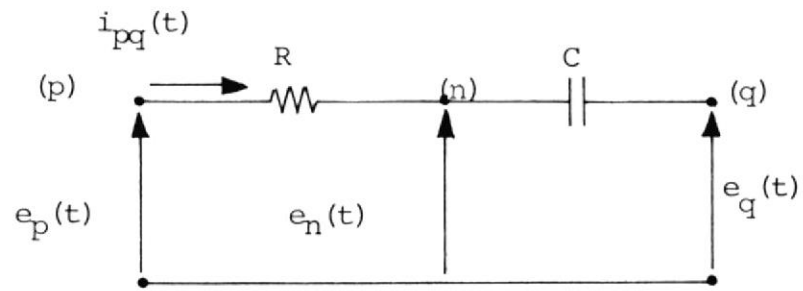


FIGURA B.4. RESISTOR Y CAPACITOR EN SERIE

$$e_n(t) - e_q(t) = 1/C \int_{-\infty}^t i_{pq}(t) dt \quad (\text{B.11})$$

La ecuación B.11 se puede escribir en la forma:

$$e_n(t) - e_q(t) = 1/C \int_{-\infty}^{t-\Delta t} i_{pq}(t) dt + 1/C \int_{t-\Delta t}^t i_{pq}(t) dt \quad (\text{B.12})$$

Además, puesto que:

$$e_n(t-\Delta t) - e_q(t-\Delta t) = 1/C \int_{-\infty}^{t-\Delta t} i_{pq}(t) dt \quad (\text{B.13})$$

La ecuación B.12 toma la forma:

$$e_n(t) - e_q(t) = e_{nq}(t-\Delta t) + 1/C \int_{t-\Delta t}^t i_{pq}(t) dt \quad (\text{B.14})$$

Aplicando la regla trapezoidal en la ecuación B.14, nos queda:

$$e_n(t) - e_q(t) = e_{nq}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2C} \{ i_{pq}(t-\Delta t) + i_{pq}(t) \}$$

(B.15)

Despejando la corriente de la ecuación B.15:

$$i_{pq}(t) = -\frac{2C}{\Delta t} \{ e_n(t-\Delta t) - e_q(t-\Delta t) \} - i_{pq}(t-\Delta t)$$

$$+ \frac{2C}{\Delta t} \{ e_n(t) - e_q(t) \}$$

(B.16)

De la ecuación B.10, se tiene:

$$e_n(t) = e_p(t) - R \cdot i_{pq}(t)$$

(B.17)

Reemplazando en la ecuación B.16 y ordenando:

$$i_{pq}(t) = \frac{1}{\frac{\Delta t}{2C} + R} \{ e_p(t) - e_q(t) \} + I_{pq}(t-\Delta t)$$

(B.18)

donde:

$$I_{pq}(t-\Delta t) = - \left\{ \frac{\frac{\Delta t}{2C} - R}{\frac{\Delta t}{2C} + R} i_{pq}(t-\Delta t) + \frac{1}{\frac{\Delta t}{2C} + R} \right. \\ \left. \{e_p(t-\Delta t) - e_q(t-\Delta t)\} \right\} \quad (B.19)$$

Por lo que, el circuito equivalente para la conexión R-C serie tiene la misma forma dada en la figura B.3, pero con $R_{eq} = R + \Delta t/2C$ y además $I_{pq}(t-\Delta t)$ según la ecuación B.19.

c. R- línea Monofásica

La ecuación para el resistor entre (p) y (n) es:

$$e_p(t) - e_n(t) = R \cdot i_{pq}(t) \quad (B.20)$$

Por otra parte, de acuerdo al análisis realizado - aplicando el Método de Bergerón, la corriente entre los extremos de la línea está determinada por:

$$i_{pq}(t) = \frac{e_n(t)}{Z} + I_{nq}(t - \zeta) \quad (B.21)$$

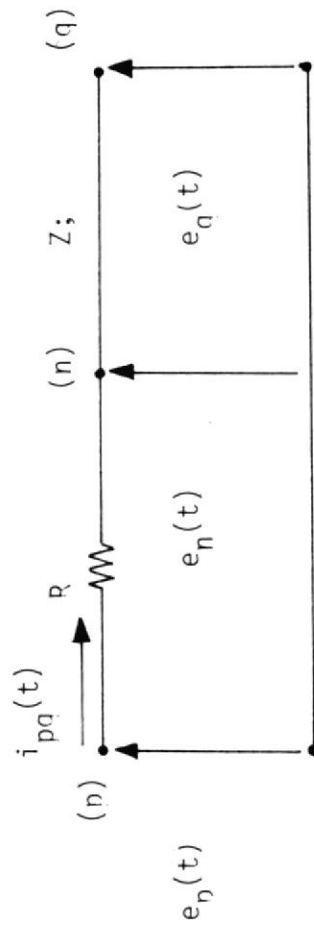


FIGURA B.5. RESISTOR Y LINEA MONOFASICA EN SERIE

$$i_{qp}(t) = \frac{e_q(t)}{Z} + I_{qn}(t-\zeta) \quad (\text{B.22})$$

Donde:

$$I_{nq}(t-\zeta) = -\left\{ \frac{e_q(t-\zeta)}{Z} + i_{qp}(t-\zeta) \right\} \quad (\text{B.23})$$

$$I_{qn}(t-\zeta) = -\left\{ \frac{e_n(t-\zeta)}{Z} + i_{pq}(t-\zeta) \right\} \quad (\text{B.24})$$

Despejando $e_n(t)$ de la ecuación B.20, reemplazando en B.21 y ordenando:

$$i_{pq}(t) = \frac{e_p(t)}{R+Z} + \frac{Z}{R+Z} \cdot I_{nq}(t-\zeta) \quad (\text{B.25})$$

Puesto que la resistencia es un elemento invariante en el tiempo:

$$e_n(t-\zeta) = e_p(t-\zeta) - R \cdot i_{pq}(t-\zeta) \quad (\text{B.26})$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación B.24, luego en B.22 y ordenando, se tiene:

$$i_{qp}(t) = \frac{e_q(t)}{Z} - \left\{ \frac{e_p(t-\zeta)}{Z} + (1 - R/Z) i_{pq}(t-\zeta) \right\} \quad (\text{B.27})$$

Del mismo modo, usando B.23 en B.25:

$$i_{pq}(t) = \frac{e_p(t)}{R+Z} - \left\{ \frac{e_q(t-\zeta)}{R+Z} + \frac{Z}{R+Z} \cdot i_{qp}(t-\zeta) \right\} \quad (\text{B.28})$$

Finalmente, definiendo fuentes de corriente equivalentes entre los nodos (p) y (q), se obtiene:

$$i_{pq}(t) = \frac{e_p(t)}{Z_{eq}} + I_{pq}(t-\zeta) \quad (\text{B.29})$$

$$i_{qp}(t) = \frac{e_q(t)}{Z} + I_{qp}(t-\zeta) \quad (\text{B.30})$$

Donde:

$$Z_{eq} = R+Z \quad (\text{B.31})$$

$$I_{pq}(t-\zeta) = - \left\{ \frac{e_q(t-\zeta)}{Z_{eq}} + \frac{Z}{Z_{eq}} i_{qp}(t-\zeta) \right\} \quad (\text{B.32})$$

$$I_{qp}(t-\zeta) = - \frac{e_p(t-\zeta)}{z_{eq}} + z/z_{eq} i_{qp}(t-\zeta) \quad (\text{B.32})$$

$$I_{qp}(t-\zeta) = - \frac{e_p(t-\zeta)}{z} + (1 - R/z) i_{pq}(t-\zeta) \quad (\text{B.33})$$

Luego, la representación equivalente para la conexión R-Línea es la dada en la figura B.6.

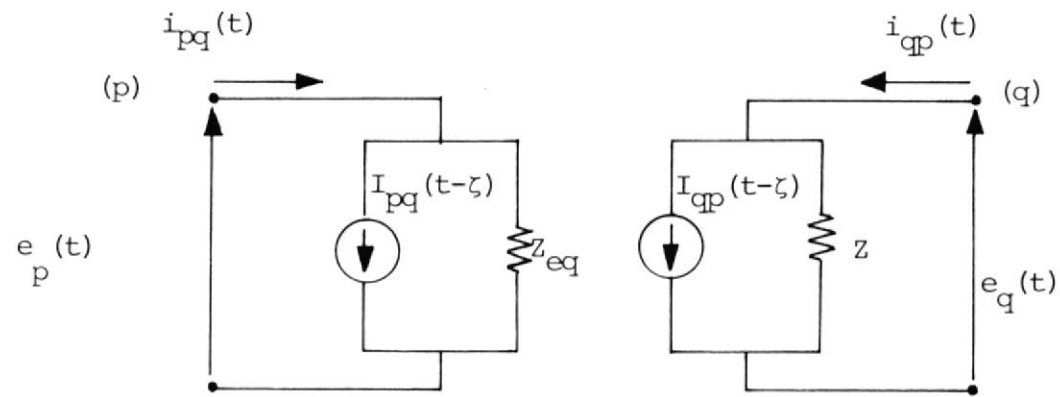


FIGURA B.6. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA CONEXION R-LINEA

APENDICE C

ECUACION EMPIRICA PARA LA APROXIMACION DE FORMAS DE ONDA

Los estudios realizados sobre las perturbaciones transientes en los sistemas de transmisión han demostrado que las descargas atmosférica dan lugar a ondas viajeras con un frente de onda escarpado. Cuando una onda de voltaje de este tipo llega a un transformador da lugar a una distribución de esfuerzos no uniforme en sus devanados y puede causar la ruptura del aislamiento del sistema. Se ha hecho por lo tanto necesario el estudio del comportamiento del aislamiento bajo el efecto de impulsos de voltaje.

Un impulso de voltajes es un voltaje unidireccional el cual alcanza rápidamente un valor máximo y luego cae lentamente a cero. La forma de onda generalmente se define en términos de los tiempos t_1 y t_2 en microsegundos, donde t_1 es el tiempo en el cual el voltaje alcanza su valor pico y t_2 es el tiempo total desde el comienzo de la onda hasta el instante en que ésta decrece a la mitad de su valor máximo, la onda se la conoce como una

onda t_1/t_2 .

Una ecuación empírica la cual representa esta forma de on da característica con bastante exactitud, y que al mismo tiempo es notablemente simple para propósitos analíticos, está dada por:

$$V(t) = E(e^{-at} - e^{-bt}) \text{ para } t > 0 \quad (\text{C.1})$$

Una mayor variedad en las formas de onda se obtiene usando la ecuación:

$$V(t) = E_1 e^{-at} - E_2 e^{-bt} \quad (\text{C.2})$$

En la ecuación C.1, los tres parámetros E , a , b , son suficientes para determinar el valor pico, la longitud de on da y el frente de onda. Los parámetros a y b pueden ser reales, imaginarios o complejos.

La cresta o valor máximo de V , ocurre cuando:

$$\frac{dy}{dt} = 0 = E(-ae^{-at} + be^{-bt})$$

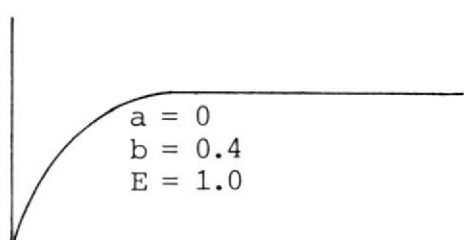
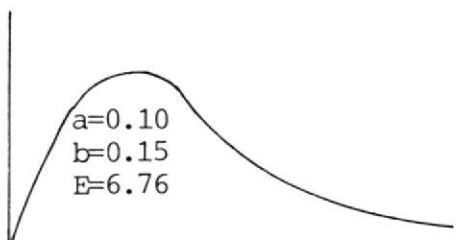
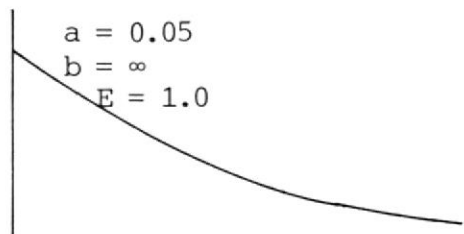
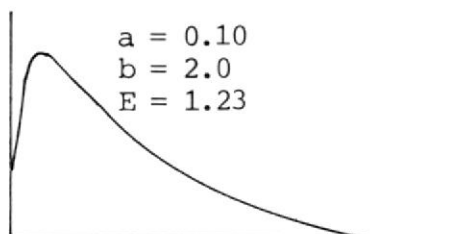
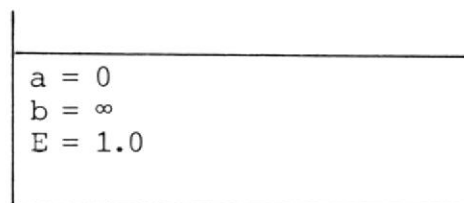
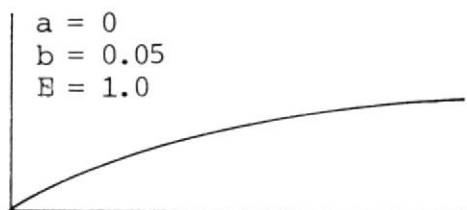


FIGURA C.1 : CASOS ESPECIALES DE LA ECUACION C.1.

Por lo tanto, el tiempo al cual ocurre el valor pico - está dado por:

$$t = t_1 = \frac{\ln b/a}{b - a}$$

El instante $t = t_2$ al cual la onda tiene un (100 p) porcentaje de V se lo determina de la ecuación:

$$V = PV_{\max} = E(e^{-at_2} - e^{-bt_2})$$

De aquí que la cresta el tiempo de frente y el tiempo de cola de la onda están determinados por tres ecuaciones simultáneas:

$$t_1 = \frac{\ln b/a}{b-a}$$

$$V_{\max} = E(e^{-at_1} - e^{-bt_1}) \quad (C.3)$$

$$p V_{\max} = E(e^{-at_2} - e^{-bt_2})$$

Donde (V_{\max}, p, t_1, t_2) son valores conocidos y (a, b, E) son los valores que se quieren hallar.

El sistema de ecuaciones C.3, puede reducirse a un sistema de dos ecuaciones simultáneas de la forma:

$$F(a,b) = be^{-bt_1} - ae^{-at_1} = 0$$

$$G(a,b) = p(e^{-at_1} - e^{bt_1}) - (e^{-at_2} - e^{-bt_2}) = 0 \quad (C.4)$$

Resolviendo este sistema, los valores de a y b quedan determinados, con lo cual:

$$E = V_{\max} / (e^{at_1} - e^{-bt_1})$$

Para resolver el sistema de ecuaciones C.4, usando el método de Newton - Raphson se creó el programa IMPUL, los datos de entrada a este programa son:

V_{\max}	VALOR MAXIMO DE LA ONDA
T_1	TIEMPO DE FRENTE
T_2	TIEMPO DE COLA
P	PORCENTAJE DE V_{\max} AL CUAL DECRECE LA ONDA EN UN TIEMPO $t = T_2$.
MAX	Número máximo de iteraciones
EPS	Precisión requerida

A VALOR INICIAL DEL PARAMETROS a
 B VALOR INICIAL DEL PARAMETRO b

Usando el programa IMPUL, se determinaran los valores de E, a y b para las siguientes ondas.

t_1/t_2	E (P.u.)	a (useg) ⁻¹	b (useg) ⁻¹
1/40	1.0212	0.017852	5.8016
1/50	1.0167	0.014194	6.0729
1.2/40	1.0258	0.017964	4.6476
1.2/50	1.0202	0.014264	4.8761
1.3/40	1.0281	0.018022	4.2137
13/50	1.0221	0.014299	4.4257
1.5/40	1.0329	0.018138	3.5326
1.5/50	1.0258	0.014372	3.7181

para todas las ondas anteriores:

$$V_{\max} = 1.0 \text{ p.u.}$$

$$P = 0.5$$

El listado del programa se da a continuación, donde se puede apreciar el orden y los formatos de lectura de los datos de entrada.

APENDICE D

CONSIDERACION DE ELEMENTOS NO LINEALES EN EL METODO DE BERGERON

Cuando existe un elemento no lineal en el sistema de potencia bajo estudio, es conveniente no incluirlo inicialmente, es decir, realizar los cálculos como si el elemento no lineal no existiera.

Primeramente se determinan las tensiones en todos los nodos de la red considerando solamente los elementos concentrados lineales y los parámetros distribuidos, luego se toma en cuenta el efecto del parámetro no lineal a través de corrientes inyectadas en los nodos en que se encuentra conectado dicho elemento, corrigiendo las tensiones en todos los nodos del sistema. En otras palabras, se aplica superposición considerando primero la red lineal y luego el efecto del elemento no lineal.

Considérese un elemento no lineal conectado entre los nodos (K) y (m):

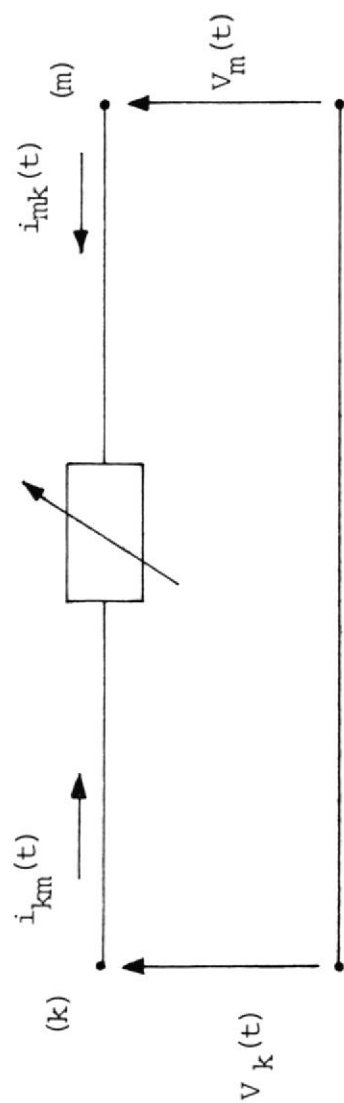


FIGURA D.1.1: ELEMENTO NO LINEAL

En general, su característica tensión-corriente será de la forma:

$$V_K(t) - V_m(t) = f(i_{km}(t)) \quad (D.1)$$

Desde el punto de vista del resto del sistema de Potencia, el efecto del elemento no lineal puede ser simulado inyectando corrientes en los nodos (k) y (m).

Las corrientes a inyectar deben ser tales que:

$$i_k = -i_{km}(t) \quad (D.2)$$

$$i_m = i_{km}(t) \quad (D.3)$$

Como puede observarse, lo anterior es equivalente a reemplazar el elemento no lineal por una fuente de corriente de valor $i_{km}(t)$.

Al aplicar superposición se designarán con el subíndice l a las tensiones que se obtienen en los nodos del sistema eléctrico de potencia cuando se consideran sólo los elementos lineales y se asumirá - que el efecto del elemento no lineal provoca una va

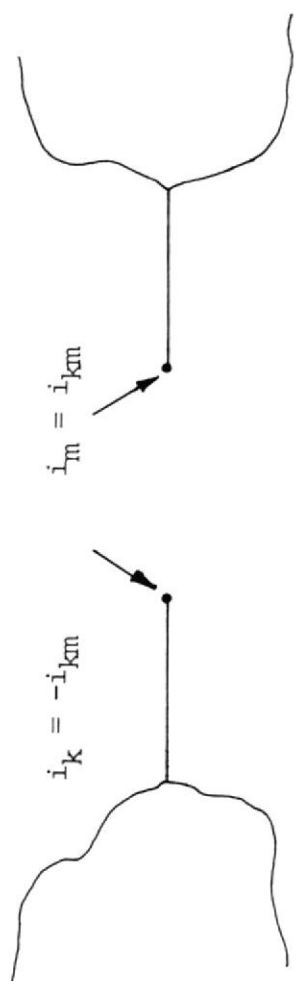


FIGURA D.2: SIMULACION DE UN ELEMENTO NO LINEAL

riación de tensión ΔV en cada nodo. La tensión final se obtiene entonces sumando ambos efectos, es decir:

$$\begin{aligned}
 V_1(t) &= V_{11}(t) + \Delta V_1(t) \\
 V_2(t) &= V_{21}(t) + \Delta V_2(t) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 V_k(t) &= V_{k1}(t) + \Delta V_k(t) \\
 V_m(t) &= V_{m1}(t) + \Delta V_m(t) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 V_n(t) &= V_{n1}(t) + \Delta V_n(t)
 \end{aligned}
 \tag{D.4}$$

De donde, para los nodos (k) y (m), se obtiene:

$$V_k(t) - V_m(t) = \{ V_{k1}(t) - V_{m1}(t) \} + \{ \Delta V_k(t) - \Delta V_m(t) \}$$

(D.5)

Se debe observar que la ecuación D.5, no contiene términos no lineales; se tiene entonces dos ecuaciones, a partir de las cuales es posible obtener la corriente i_{km} .

$$\begin{aligned}
 V_k(t) - V_m(t) &= \{ V_{k1}(t) - V_{m1}(t) \} + \{ \Delta V_k(t) - \Delta V_m(t) \} \\
 &= f_1 (i_{km}) \\
 V_k(t) - V_m(t) &= f_2 (i_{km}) \qquad (D.6)
 \end{aligned}$$

En forma gráfica, la solución del sistema de ecuaciones no lineales D.6 se obtiene de la intersección de f_1 y f_2 .

Con el objeto de proporcionar un camino para que circule la corriente de descarga y no permitir que las sobretensiones dañen los elementos del sistema eléctrico de potencia, asegurando de esta manera la continuidad de servicio, se utilizan los pararrayos.

Cuando las condiciones de operación del sistema son normales, el pararrayos debe ser un aislador perfecto, tal que no exista circulación de corriente a través de él. En presencia de un fenómeno transiente y cuando queda sometido a una tensión que excede los niveles del aislamiento, el pararrayos debe comportarse como un elemento conductor, permitiendo el paso de la corriente. Cuando desaparece el estado anormal, el pararrayos debe ser capaz de transformarse -

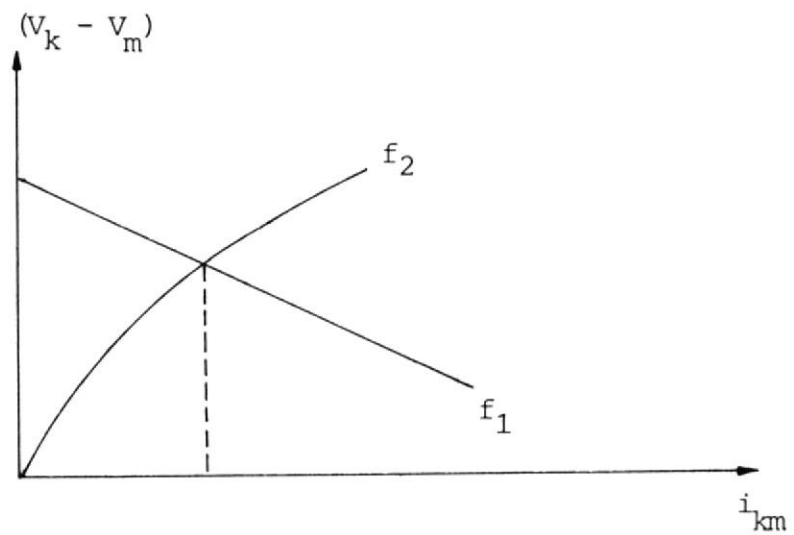


FIGURA D.3. SOLUCION GRAFICA DEL SISTEMA DE ECUACIONES D.6.

nuevamente en un buen aislador, interrumpiendo el arco de modo que no alcancen a operar otras protecciones del sistema.

Las diferencias principales entre los tipos de pararrayos que se fabrican radican en el proceso que se realiza para el restablecimiento del estado aislante, en la magnitud de la corriente que es capaz de descargarse y en la onda de tensión permitida entre sus terminales.

De acuerdo a sus principios básicos de operación se clasifican en:

- Pararrayos tipo expulsión
- Pararrayos tipo válvula

Cuando aparece una sobretensión entre los terminales del pararrayos tipo expulsión, éste conduce con una impedancia determinada sólo por la resistencia del arco. La magnitud de la corriente subsiguiente queda determinada principalmente por la tensión e impedancia del sistema y puede variar en un amplio rango dependiendo de los KVA del sistema eléctrico de Potencia y de la ubicación del pararrayos, por lo cual es incierto proponer una curva característica para este

tipo de dispositivo.

El pararrayos tipo válvula contiene en su interior una serie de elementos que tienen por objeto limitar la corriente subsiguiente a valores que permitan interromper el arco, la tensión no se incrementa en forma directamente proporcional a la corriente y el elemento tiene un límite de tensión característico. Además de limitar el flujo de corriente, este elemento limita también la tensión a niveles adecuados.

En la práctica resulta complicado trabajar con la característica real del elemento, por lo cual una solución es tomar una curva promedio cuya ecuación puede representarse de la siguiente forma:

$$I_p = K_p \cdot V_p^z \quad (D.7)$$

Donde:

I_p = Corriente por el elemento no lineal

V_p = tensión aplicada

K_p = constante que depende de las características físicas y dimensiones del pararrayos.

$$Z = 3$$

Es conveniente considerar la característica no lineal del pararrayos mediante su característica estática, aproximada por tramos rectos; la ecuación de ésta curva es la ecuación D.7.

De lo anterior se concluye que el modelo es válido, bajo las aproximaciones realizadas, sólo para el caso del pararrayos tipo válvula.

De acuerdo al análisis realizado para un elemento no lineal cualquiera y a partir de la ecuación 4.43, el sistema de ecuaciones a resolver para obtener las tensiones cuando solo se consideran los elementos lineales es:

$$\{Y_{AA}\} \{V_e(t)\} = \{i_e(t)\} - \{I_A\} - \{Y_{AB}\} \{V(t)\} \quad (D.8)$$

Haciendo:

$$\{I_{TOTAL}\} = \{i_e(t)\} - \{I_A\} - \{Y_{AB}\} \{V(t)\} \quad (D.9)$$

El sistema se reduce a:

$$\{Y_{AA}\} \{V_1(t)\} = \{I_{TOTAL}\} \quad (D.10)$$

De aquí se obtienen las tensiones $\{V_1(t)\}$, debidas sólo a elementos lineales.

Para obtener el vector $\{\Delta V\}$ debido al efecto del pararrayos, se debe resolver un sistema similar a D.10, esto es:

$$\{Y_{AA}\} \{\Delta V\} = \{I_P\} \quad (D.11)$$

De donde:

$$\{\Delta V\} = \{Y_{AA}\}^{-1} \{I_P\} \quad (D.12)$$

Suponiendo que el pararrayos se encuentra conectado entre el nodo (k) y tierra, la forma explícita de D.12 es:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_k \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1k} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2k} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & & Z_{kk} & & Z_{kn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nk} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_P \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (D.13)$$

De aquí, resolviendo para el nodo (k) se obtiene V_k , es decir:

$$V_k = V_{k1} + \Delta V_k = V_{k1} - Z_{kk} \cdot I_p \quad (D.14)$$

Por otra parte, considerando la característica del pararrayos:

$$V_k = f(I_p) \quad (D.15)$$

Se tiene el siguiente sistema de ecuaciones a resolver:

$$V_k = V_{k1} - Z_{kk} I_p$$

$$V_k = f(I_p) \quad (D.16)$$

Aproximando la curva característica $f(I_p)$ por medio de tramos rectos, se tiene.

A partir de la pendiente del tramo en que se intersectan las curvas de la figura D.4, se puede obtener V_p .

$$V_p = V_{p1} + M(I_p - I_{p1}) \quad (D.17)$$

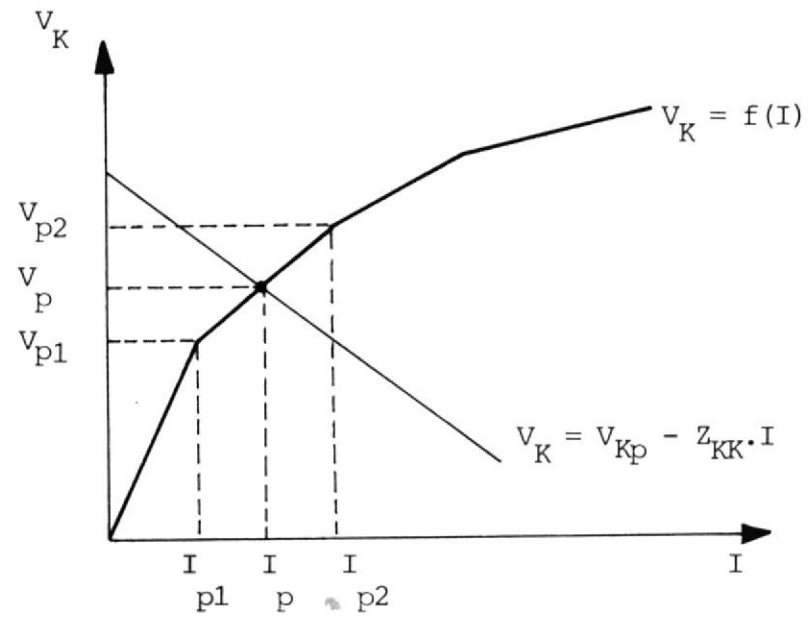


FIGURA D.4. CARACTERÍSTICA DEL PARARRAYOS APROXIMADA POR TRAMOS RECTOS

Donde:

$$M = (V_{p2} - V_{p1}) / (I_{p2} - I_{p1}) \quad (D.18)$$

Por otro lado:

$$V_p = V_{k1} - Z_{kk} I_p \quad (D.19)$$

De las ecuaciones D.17 y D.19, obtenemos:

$$V_{k1} - Z_{kk} I_p = V_{p1} + M(I_p - I_{p1}) \quad (D.20)$$

Luego la corriente a través del pararrayos es:

$$I_p = \frac{V_{k1} - V_{p1} + M I_{p1}}{Z_{kk} + M} \quad (D.21)$$

Reemplazando ahora I_p en las ecuaciones D.13, se determina completamente el vector $\{\Delta V\}$, con lo cual las tensiones reales en el sistema eléctrico de Potencia, considerando el efecto del pararrayos, se determina como:

$$\{V(t)\} = \{V_1(t)\} + \{\Delta V(t)\} \quad (D.22)$$

APENDICE E

SOBRETENSIONES EN REDES TRIFASICAS: TRANSFORMACION MODAL

El comportamiento eléctrico de una línea de transmisión trifásica puede representarse por medio de sus parámetros (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia), expresados por unidad de longitud y por fase para cada circuito.

Si la línea tiene transposiciones, estos parámetros resultan ser matrices simétricas de (3 x 3). Se considerará sólo el caso de líneas trifásicas con transposición y, en forma análoga al caso monofásico, se supondrá que las líneas son ideales.

Los parámetros concentrados se representarán a través de una matriz diagonal, en general estas matrices tienen la forma:

$$\{L\} = \begin{bmatrix} L_S & L_m & L_m \\ L_m & L_S & L_m \\ L_m & L_m & L_S \end{bmatrix} \quad \{C\} = \begin{bmatrix} C_S & C_m & C_m \\ C_m & C_S & C_m \\ C_m & C_m & C_S \end{bmatrix}$$

$$\{ R \} = \begin{bmatrix} R_a \\ \\ R_b \\ \\ R_c \end{bmatrix}$$

Donde:

L_s, C_s : Inductancia y capacitancia propias

L_m, C_m : Inductancia y Capacitancia mutuas

R_i : Resistencia en serie con la fase i ($i=a,b,c$)

En forma similar a las ecuaciones para la tensión y la corriente obtenidos para una línea monofásica, las ecuaciones de equilibrio para un tramo ΔX de una línea ideal trifásica son:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \{V(x,t)\} = \{L\} \frac{\partial}{\partial t} \{i(x,t)\} \quad (E.1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \{i(x,t)\} = \{C\} \frac{\partial}{\partial t} \{V(x,t)\} \quad (E.2)$$

Donde:

- $\{V(x,t)\}$: vector de tensiones de fase a tierra
- $\{i(x,t)\}$: vector de corrientes de línea
- $\{L\}$: matriz de inductancia por unidad de longitud.
- $\{C\}$: Matriz de capacitancias por unidad de longitud.

Derivando las ecuaciones E.1 y E.2, y haciendo los reemplazos adecuados, se obtiene:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \{V(x,t)\} - \{L\}\{C\} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{V(x,t)\} = 0 \quad (E.3)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \{i(x,t)\} - \{L\}\{C\} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{i(x,t)\} = 0 \quad (E.4)$$

Como $\{L\}$ y $\{C\}$ son matrices llenas, la solución directa de las ecuaciones anteriores es complicada. En forma análoga a la simplificación que se obtiene usando componentes simétricas, en la solución de redes trifásicas con parámetros concentrados, es posible emplear una transformación lineal para diago-

Realizar el producto matricial $\{L\}\{C\}$ del sistema de ecuaciones. Esto hace posible calcular valores de ondas que se propagan en forma independiente, ya que el sistema de ecuaciones diferenciales transformado resulta desacoplado.

El método que permite realizar esta transformación, en forma efectiva, es conocido como "Método Modal". El hecho de que las ecuaciones que resultan al aplicar la transformación modal son independientes, permite realizar un análisis similar al caso monofásico, considerando impedancias características y velocidades de propagación propias para cada modo.

Sea:

$\{P\} = \{L\}\{C\}$: Matriz de constantes de propagación

Considerando sólo la ecuación para las tensiones y reemplazando, se puede escribir:

$$\frac{\partial^2}{\partial X^2} \{V(x,t)\} - \{P\} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{V(x,t)\} = 0 \quad (E.5)$$

Empleando la transformación modal:

$$\{V(x,t)\} = \{M\} \{V_m(x,t)\} \quad (E.6)$$

Donde:

$\{M\}$ = Matriz de transformación modal

$\{V_m(x,t)\}$ = vector de tensiones en Componentes modales

Reemplazando E.6 en E.5 y posteriormente pre-multiplicando por $\{M\}^{-1}$, se obtiene:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \{V_m(x,t)\} - \{M\}^{-1} \{P\} \{M\} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{V_m(x,t)\} = 0 \quad (E.7)$$

Definiendo:

$$\{\lambda\}^2 = \{M\}^{-1} \{P\} \{M\} \quad (E.8)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \{V_m(x,t)\} - \{\lambda\} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \{V_m(x,t)\} = 0 \quad (E.9)$$

La matriz de transformación modal M se debe elegir de modo que $\{\lambda\}^2$ resulte una matriz diagonal, es decir:

$$\{\lambda\} = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 \\ \lambda_2^2 \\ \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (E.10)$$

Algunas matrices de transformación modal válidas para el caso trifásico con transposiciones son:

$$\{M\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \{M\} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 1 & 1 & -1/2 \\ 1 & -1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{M\} = \begin{bmatrix} 1/3 & -1/6 & 1/2 \\ 1/3 & 2/3 & 0 \\ 1/3 & -1/6 & -1/2 \end{bmatrix}$$

Para una línea trifásica con transposiciones se cumple que:

$$\{P\} = \{L\} \{C\} = \{C\} \{L\} = \begin{bmatrix} P_S & P_m & P_m \\ P_m & P_S & P_m \\ P_m & P_m & P_S \end{bmatrix} \quad (\text{E.11})$$

Donde:

$$P_S = L_S C_S + 2L_m C_m$$

$$P_m = L_S C_m + L_m C_S + L_m C_m$$

De lo anterior se puede verificar que:

$$\{\lambda\}^2 = \{M\}^{-1} \{P\} \{M\} = \begin{bmatrix} P_S + 2P_m & & \\ & P_S - P_m & \\ & & P_S - P_m \end{bmatrix} \quad (\text{E.12})$$

Por lo que:

$$\lambda_1^2 = P_S + 2P_m \quad (\text{modo 1})$$

$$\lambda_2^2 = \lambda_3^2 = P_S - P_m \quad (\text{modos 2 y 3})$$

Reemplazando en E.9:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} V_{m1}(x,t) \\ V_{m2}(x,t) \\ V_{m3}(x,t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & & \\ & \lambda_2^2 & \\ & & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{bmatrix} V_{m1}(x,t) \\ V_{m2}(x,t) \\ V_{m3}(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{E.13})$$

Puede observarse que una vez obtenidos los modos de propagación para la línea trifásica, se puede tratar cada una de las ecuaciones que resultan al aplicar -

la transformación modal en forma independiente, como si correspondiera al caso simple de una línea monofásica - por la cual se propaga una onda con la velocidad correspondiente a su modo.

En términos de las inductancias y capacitancias de secuencia, se puede comprobar que:

$$\lambda_1 = \sqrt{L_0 C_0} \quad (E.14)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \sqrt{L_1 C_1} \quad (E.15)$$

Donde:

L_0, L_1 : Inductancia de secuencia cero y de secuencia positiva, respectivamente.

C_0, C_1 : Capacitancia de secuencia cero y de secuencia positiva, respectivamente.

Por analogía con el caso monofásico se puede definir:

$\mu_1 = 1 / (\sqrt{L_0 C_0})$ = velocidad de propagación para el modo 1

$\mu_2 = \mu_3 = 1 / (\sqrt{L_1 C_1})$ = velocidad de propagación para los modos 2 y 3.

De aquí se obtienen los tiempos de tránsito para cada modo, considerando la longitud de la línea.

$$\zeta_1 = 1/\mu_1 = 1/\sqrt{L_0 C_0}$$

$$\zeta_2 = \zeta_3 = 1/\mu_2 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$$

ζ_1 , ζ_2 y ζ_3 , son los tiempos de tránsito para los modos 1, 2 y 3, respectivamente.

Las impedancias características de la línea en el dominio modal son:

$$Z_{m1} = \sqrt{L_0 C_0} : \text{ Impedancia característica para el modo 1} \quad (E.16)$$

$$Z_{m2} = Z_{m3} = \sqrt{L_1 C_1} : \text{ Impedancia característica para los modos 2 t 3} \quad (E.17)$$

La demostración de E.16 y E.17, está fuera de los objetivos de esta tesis, sin embargo se mencionan aquí a manera de información.

Usando las impedancias características y los tiempos -

de tránsito de la línea en el dominio modal, se pueden calcular las tensiones y corrientes modales siguiendo el mismo procedimiento empleado para una línea monofásica.

Una vez obtenidas las tensiones modales en los terminales de la línea trifásica, se calculan las tensiones en componentes de fase aplicando la matriz de transformación, es decir:

$$\begin{bmatrix} V_a(x,t) \\ V_b(x,t) \\ V_c(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m1}(x,t) \\ V_{m2}(x,t) \\ V_{m3}(x,t) \end{bmatrix} \quad (\text{E.18})$$

B I B L I O G R A F I A

1. FREY, W.; P. ALTHAMER, "THE CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS ON LINES BY MEANS OF DIGITAL COMPUTER". THE BROWN POVERY REVIEW, VOL. 48, N^o 5/6, 1961, pp. 344-355.
2. DOMMEL, H.W., "A METHOD FOR SOLVING TRANSIENT PHENOMENA IN MULTIPHASE SYSTEMS". PROCEEDING 2Da. CONFERENCE POWER SYSTEM COMPUTATION". 1966, REPT. 5.8.
3. DOMMEL, H.W., "DIGITAL COMPUTER SOLUTION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN SINGLE AND MULTIPHASE NETWORKS". IEEE. TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS-88, N^o 4, APRIL 1969, pp. 388-396.
4. McElroy, A.J., AND R.M. PORTER, "DIGITAL COMPUTER CALCULATION OF TRANSIENTS IN ELECTRIC NETWORKS", TRANS. IEEE, 1963, PAS-82, pp. 88.
5. GREENWOOD, A., "ELECTRICAL TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS", WILEY, NEW YORK, 1971.
6. BEWLEY, L.V., "TRAVELLING WAVES ON TRANSMISSION SYSTEMS", DOVER BOOKS, NEW YORK, 1961.

7. "ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK"
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORP., EAST PITTSBURGH, PENNSYLVANIA.
8. WEEDY, B.M., "ELECTRIC POWER SYSTEMS", WILEY, THIRD EDITION.
9. HENRIQUEZ, G., "TECNICA DE LAS ALTAS TENSIONES", VOL.II.
EDITORIAL LIMUSA, S.A. 1976.



A.F. 142547