

PROBLEMAS ESPECIFICOS DE LA SIMULACION  
DE CIRCUITOS ELECTRICOS EN MINIORDENADOR

SERGIO VERDU

Los alicientes que presentan los sistemas interactivos dedicados al diseño y la enseñanza con ayuda de ordenador originaron el proyecto del programa de simulación de circuitos eléctricos analógicos en minordenador que se presenta en este artículo. Dicho proyecto está dedicado al análisis frecuencial y transitorio de redes pasivas y activas, lineales e invariantes de tamaño medio, cumpliendo con los requisitos de un programa general de simulación de circuitos.

La implementación del programa en condiciones muy limitadas de almacenamiento, velocidad y formatos requiere métodos sistemáticos de resolución distintos de los empleados en los programas generales de análisis y comporta algunos efectos singulares en cuanto a la fiabilidad de los datos obtenidos. Al ilustrar dichos efectos se destaca su analogía con los factores restrictivos típicamente presentes en la experimentación de sistemas eléctricos: ruido y ancho de banda limitado.

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 Utilización de los programas de simulación de redes.

Aunque los primeros programas de simulación de circuitos eléctricos comenzaron a aparecer a finales de los años 60, la mayoría de los que se utilizan hoy en día datan de unos 4-8 años atrás /2/, /3/. Su desarrollo se ha llevado a cabo por Universidades, Compañías de ordenadores, Servicios de Defensa y Empresas de producción de sistemas electrónicos, principalmente. Su objetivo general es la determinación de la respuesta de una red a una(s) determinada(s) entrada(s). Algunos de ellos son capaces de tratar redes no lineales, no invariantes o de parámetros distribuidos y los más avanzados (segunda generación) incorporan características específicamente orientadas hacia el diseño de redes: análisis estadísticos de tolerancias (Monte-Carlo), caso peor, optimización, etc.

Los factores económicos en la utilización de programas de redes no se derivan principalmente de los costos de adquisición del software necesario, sino de otros factores:

(a) La implementación de los programas se de

- S. Verdú de la Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Telecomunicació de Barcelona. J. Girona Salgado, s/n. Barcelona - 34.
- Article rebut el Setembre del 1979.

be realizar en grandes ordenadores con capacidad de almacenamiento central suficiente para albergar las necesidades de cada caso particular (125-350 kbytes por regla general) y suficientemente rápidos como para poder simular con eficiencia redes modulares de los ordenes normales de diseño.

(b) El tiempo dedicado al proceso de simulación en ordenador puede quedar fuera de las estimaciones requeridas para el proceso global de diseño, en especial cuando no hay -- otros requisitos (grado de precisión, fiabilidad, análisis de tolerancias, etc.) que -- justifiquen el empleo del ordenador frente a otros métodos de simulación. Es más probable que ello suceda cuando se emplea un proceso en batch, que impide la interacción del usuario, ventajosa en relación a dos factores -- primordialmente:

- codificación/transcripción de datos, donde existe la posibilidad de utilizar un sistema interactivo subsidiario dotado de programas de edición de datos para cada programa en particular y conectado con el ordenador grande directamente o mediante periféricos: perforadoras de cinta, de tarjetas o unidades de cinta magnética, por ejemplo.

- datos de salida requeridos, puesto que en el análisis de redes (y en particular si está inscrito en un CAD -Computer Aided Design-) los datos de salida que se piden -- vienen -en una buena parte- en función de los datos previamente obtenidos por el -- usuario (principalmente en casos de gran - desconocimiento del comportamiento o función de la red, en los que hay que seguir un ciclo de "prueba y error").

Debido a estas limitaciones económicas las - vías usuales de simulación automática de redes en un proceso de diseño son a través de: (a) en alquiler de servicios (centro de cálculo) vía en la que la profundidad del análisis viene restringida fuertemente por la inversión del diseño, (b) a través de un sistema de proceso propio capaz de ejecutar los programas de forma eficiente y dotado de las características enunciadas.

### 1.2 Conveniencia de un proyecto para miniordenador

A pesar del rápido crecimiento actual de las prestaciones de los pequeños ordenadores (en capacidad de almacenamiento central principalmente), los proyectos de segmentación de los programas generales de simulación de redes no han llegado a poderse comercializar - en este campo /4/, /21/. En general, la barrera se ha situado en el análisis frecuencial de redes de tamaño medio. Algunos ejemplos son: /13/, /14/, /15/.

En el terreno de la Universidad, actualmente, cada vez es mayor la tendencia al empleo del ordenador en la enseñanza de teoría y diseño de circuitos y disciplinas relacionadas /8/, /9/, principalmente para hacer que el tiempo de aprendizaje esté más dedicado a aspectos conceptuales que a los de procedimiento y - adiestramiento en análisis. Se han llevado a la práctica dos aproximaciones a esta filosofía:

- (a) Utilización de los programas generales de análisis de redes si es factible el acceso a un ordenador grande que los posea.
- (b) Implementación por parte del estudiante de programas específicos dirigidos a la resolución de ciertos procesos particulares dentro del análisis de redes (p.e. convolución,

resolución de sistemas de ecuaciones y de -- ecuaciones diferenciales) --correspondientes a la primera generación de programas de CAD-. Algunos textos recientes /5/, /6/, /7/ se -- han hecho eco de la integración del ordenador en la enseñanza de redes y siguiendo esta vía, presentan programas escritos en lenguajes de alto nivel de uso técnico (FORTRAN, BASIC) con una arquitectura auto-explicativa y dirigidos, como ya se ha dicho, a la resolución de procesos aislados dentro del análisis.

Ambas aproximaciones se complementan respectivamente, pues mientras la primera resuelve problemas de mayor alcance con una pequeña - preparación previa, la segunda suele ser más accesible y pone más en contacto al estudiante con las características y problemas del - cálculo automático, transparentes en la primera.

Como experimentación de los problemas que surgen en condiciones de implementación restringidas y como amalgama de ambas vías docentes surgió el proyecto de un programa de simulación de redes en miniordenador /1/, que cumpliera los requisitos fundamentales de un -- programa general de análisis de circuitos /11/.

## 2. METODO DE ANALISIS

El éxito del proyecto se debe determinar sobre una evaluación conjunta de la complejidad de las redes y la eficiencia -en tiempo y exactitud- de su análisis. Ello dependerá principalmente de que la elección del tipo - de redes a simular y del proceso de análisis sistemático en el que se basen los algoritmos se adapte a nuestras condiciones particulares de hardware y sistema operativo.

### 2.1 Condiciones restringidas

El proyecto se realizó en el laboratorio de ordenadores de la ETSITB en el miniordenador DEC PDP11/20, sistema operativo RSTS11, conversacional, en tiempo compartido, con "disk packs" de almacenamiento periférico y 8 kwords de almacenamiento central (por usuario) para mantener las variables y una versión precompilada del código. Algunos procesos en especial: acceso a disco, swapping, interpretación reiterada de cada instrucción de programa contribuyen a aumentar en gran medida la lentitud

inherente al hardware. El formato de coma -- flotante es de dos palabras de 16 bits, con una precisión de unos siete dígitos significativos y cuyo valor absoluto puede ser cero o pertenecer al intervalo  $0.14 E-38$ ,  $1.7 E+38$ .

Las tres restricciones de almacenamiento, velocidad y formatos comportan respectivamente la necesidad de utilizar memoria periférica ("matrices virtuales"), la limitación del tamaño de las redes analizables, y la disminución de la fiabilidad de las salidas, ilustrada en el tercer apartado.

## 2.2 Comparación y elección del método

En general, el análisis sistemático de las redes analógicas da lugar a la resolución de un conjunto de incógnitas que puede ser objeto de la breve clasificación de la Tabla 1. Obsérvese que cada tipo de análisis es una generalización de los anteriores. Los dos primeros ofrecen unas posibilidades de simulación muy limitadas por lo que quedan descartados como aproximaciones principales de un programa general de análisis. La mayoría de estos programas - incluso los que tratan con redes lineales invariantes únicamente - siguen el último método debido a su generalidad y a que al ser eminentemente numérico - se apoya en última instancia en rutinas de integración de funciones reales - tiene una implementación natural en el ordenador digital.

Sin embargo, las severas limitaciones a las que se ven sometidas las condiciones de nuestro diseño hacen necesaria la máxima disminución de la cantidad de operaciones a realizar, eligiendo para ello un método lo más -- 'analítico' posible. (Contraponemos método numérico a método analítico en el sentido de que mientras el primero se fundamenta en la serie de cálculos que realiza, el segundo se basa en la utilización de tablas y en la evitación en lo posible de algoritmos aproximativos. Es una dicotomía resultante de la conocida transacción tiempo/memoria en el diseño de los sistemas de proceso de datos).

Entre los métodos transformados, existen algoritmos, eminentemente numéricos, muy optimizados en el terreno de la transformación de Fourier implementada en ordenador (FFT - Fast Fourier Transform), con la ventaja in-

herente de que una parte de los análisis frecuencial y temporal es común. La transformación de Laplace es simple y tratable por procesos analíticos en el caso particular de -- transformadas de Laplace racionales de coeficientes reales que aparecen en el análisis de redes lineales invariantes realizables sometidas a estímulos con transformada de Laplace racional (sinusoides, exponenciales, rampas, escalones, impulsos...). Por los argumentos relativos a las características del método a elegir nuestra elección recae en la transformación de Laplace con el cálculo previo de la función de red transformada. (La analiticidad de este método se deriva de que el cálculo de transformadas inversas de funciones racionales se basa en tablas de -- transformadas inversas elementales, las cuales a su vez se fundamentan en las tablas de funciones intrínsecas del sistema operativo-exponencial, seno, coseno-). Más adelante se verá cómo, mediante el diseño de un algoritmo adecuado, se puede simular la respuesta de las redes a estímulos periódicos con -- transformada de Laplace no racional usuales en el laboratorio (ondas cuadradas, triangulares, trenes de impulsos, etc.).

## 3. ESTRUCTURA Y ALGORITMOS

Los seis subprogramas en que está segmentado el programa se pueden clasificar en tres grupos:

- (A) Caracterización de la red mediante el cálculo de la función de red transformada  $H(s)$ .
- (B) Respuesta frecuencial (SSS - Sinusoidal Steady State) de la red a partir de  $H(s)$  |  $s=j\omega$
- (C) Respuesta temporal libre o forzada, a partir de  $H(s)$  + excitación.

La modularización comporta la ventaja de que el usuario puede abordar con facilidad el análisis de la red desde distintos niveles: a partir por ejemplo, de su descripción topológica, de su función de red o de su respuesta transformada; o bien puede abordar la resolución de procesos específicos: búsqueda de polos y ceros, transformada inversa de Laplace, resolución de sistemas de ecuaciones de coeficientes racionales polinómicos, des-

Tabla 1.  
Tipos de análisis sistemáticos de redes eléctricas

FORMULACION MATEMATICA	ADECUADA PARA EL ANALISIS:	MÉTODOS TÍPICOS DE RESOLUCION
<u>SISTEMAS DE ECUACIONES ALGEBRAICAS</u> DE COEFICIENTES REALES	DC (continua) redes resistivas lineales determinación de c.iniciales	Cálculo Matricial
DE COEFICIENTES COMPLEJOS	AC (alterna) SSS a.frecuencial redes lineales	Cálculo Matricial
<u>SISTEMAS DE ECUACIONES DIFERENCIALES</u> LINEALES DE COEFICIENTES CONSTANTES	Temporal (transitorio) y frecuencial SSS de redes lineales invariantes	Transformados (Fourier, Laplace...)
CASO GENERAL (FORMULACION EN ECUACIONES DE ESTADO)	Temporal (transitorio) de redes lineales y no linea- les invariantes y no invariantes	Métodos numéricos de resolución de ecua- ciones diferenciales

composición en suma de fracciones simples, - etc. Además la estructura adoptada de subprogramas/ficheros con la posibilidad de -- efectuar las entradas interactivamente o a través de ficheros posibilita su utilización como base de otros programas de diseño.

Son tratables las redes lineales invarian - tes compuestas por resistores, inductores, condensadores, fuentes de tensión/corriente controladas por corriente/tensión o por sus respectivas derivadas e integrales tempora - les y fuentes independientes de tensión o - de corriente como excitaciones de la red. En redes que incluyan otros dispositivos - que actuen en un margen lineal - es necesario su modelado con componentes de los tipos ante - riores. El mínimo error de modelado depende - rá fundamentalmente del grado de validez de la suposición de funcionamiento lineal.

La topología de la red a analizar se descri - be al ordenador en dos formulaciones alter - nativas: nodos o mallas. Esta es una caracte - rística única entre los programas genera - les de análisis, los cuales adoptan una u - otra (principalmente la primera, por su com - pleta generalidad y su mayor comodidad en - grandes redes) con algunas modificaciones -- especiales en algún caso - p.e., MARTHA /22/ utiliza una formulación complementaria por -

puertos, COMPACT /23/ posee modelos de agru - paciones usuales de elementos, ECAP II utili - za una formulación por ramas /20/ -. (No de - be confundirse el tipo de formulación de la descripción de la red con el tipo de análi - sis sistemático, no viniendo la elección de éste determinada por aquél). La complejidad adicional de diseño que supone la fórmula - ción dual es mínima pues sólo varía la in - terpretación de los datos de entrada. Esta opción tiene como primera consecuencia el - ahorro de tiempo de cálculo de las redes en las que una formulación presenta menor núme - ro de incógnitas que la otra. El usuario da para cada componente del circuito: el tipo - de elemento, su valor (en un sistema cohe - rente de unidades) y los dos nodos/mallas en los que está conectado. Esta descripción tie - ne como imagen eléctrica una única red dado que la forma de interconexión de cada par de nodos/mallas viene dada por los elementos - que son comunes y topológicamente las n! for - mas de interconexión de n elementos en parale - lo o en serie son equivalentes en redes de parámetros concentrados.

(A) Se efectúa una caracterización de la red para el par requerido de entrada/salida me - diante una función de red transformada  $H(s)$  - de transferencia de tensión o de corriente, de impedancia/admitancia de entrada/salida o

de transferencia. La determinación de  $H(s)$  - se lleva a cabo a partir de la resolución de un sistema de ecuaciones cuyos coeficientes son fracciones racionales de  $s$ . Para una formulación por corrientes de malla (dual en la formulación por nodos) se puede poner el sistema en la siguiente forma matricial:

$$\bar{V} = (\bar{A} \cdot \frac{1}{s} + \bar{B} + \bar{E} \cdot s) \cdot \bar{I} \quad (1)$$

donde los coeficientes  $A(i,j)$  son valores inversos de capacidades,  $B(i,j)$  son resistencias y  $E(i,j)$  son coeficientes de inducción;  $I(i)$  son las corrientes de malla incógnitas y  $V(i)$  son los valores de las fuentes de tensión. Para su resolución se utiliza la regla de Cramer y el cálculo de los determinantes se realiza mediante un método de reducción/expansión de Laplace en cofactores. El empleo de determinantes, aún siendo ineficiente con grandes redes (debido al rápido crecimiento del tiempo de ejecución con el tamaño de la red) /10/, es justificable aquí, por los aceptables resultados obtenidos con las redes de tamaño mediano (de orden menor que 9) y por su menor extensión y complejidad. En la Tabla 2 se pueden ver resultados de tiempo para la red de la Figura 1 (de 8 nodos y 21 ramas), obtenidos con diversos sistemas operativos en los que se ha implementado la rutina.

(B) El análisis frecuencial en SSS se lleva a cabo por evaluación directa en variable compleja de los polinomios de la función de red. Para lograr una mayor exactitud en los resultados, en vez de emplear una evaluación directa en potencias, se ponen los polinomios en la forma:

$$\sum_0^n a_i s^i = a_0 + s(a_1 + s(a_2 + s(a_3 + \dots + s(a_{n-1} + a_n s) \dots))) \quad (2)$$

Algunos autores /10/, /12/ sostienen que éste es el método más eficiente. Hemos podido comprobarlo excepto en el caso de existencia de polos y ceros muy cercanos al eje imaginario (bandas estrechas) en el que el método vectorial ofrece una mayor exactitud si previamente se han calculado los polos y ceros con un grado de aproximación suficiente. Pueden obtenerse diagramas de amplificación, ganancia y fase en escalas lineales o logarít-

micas (Bode).

(C) El análisis temporal tiene uno de los siguientes objetivos:

- (a) respuesta a condiciones iniciales de los elementos almacenadores de energía (zero-input).
- (b) respuesta a estímulos independientes (zero-state).
- (c) respuesta total (superposición de las respuestas zero-input y zero-state).

El análisis temporal se basa en el cálculo de la transformada inversa de Laplace de una función racional, el cual se realiza mediante: descomposición en fracciones simples y transformación inversa de cada fracción. En la descomposición en fracciones se emplea el algoritmo de Lin-Bairstow /5/ para la búsqueda de polos y ceros; es rápido, pero al emplear formatos de precisión simple su convergencia no se logra en ocasiones (apr. 15%). Como ya se mencionó la transformación inversa de cada fracción se realiza a través de una tabla almacenada de las transformadas de Laplace elementales.

Los estímulos de la red posibles son fuentes independientes de corriente o tensión cuyas funciones temporales:

- (a) tengan transformada de Laplace racional
- (b) se puedan descomponer en la expresión:

$$f(t) = c_0 x(t) + c_1 x(t-T) + c_2 x(t-T-P) + \dots + c_n x(t-T(n-1)P) \quad (3)$$

con

$x(t)$  del tipo (a)

$c_0, T, P$  parámetros de la onda  $n$  dependiente de la longitud del intervalo de tiempo analizado y del valor  $P$ .

$$c_i = \pm c_{i-1}$$

- (c) se puedan expresar como superposición de funciones de los tipos (a) y/o (b).

Entre las señales del tipo (b) se hallan las funciones 'no lineales' periódicas más usuales en el laboratorio: tren de impulsos, se-

Tabla 2  
 Tiempo (seg.) de cálculo de la función de red  $V_o/I_i$  de la Figura 1.

	7 NODOS <sup>1</sup>	8 NODOS
PDP11/20 <sup>2</sup>	87	285
HP3000 II <sup>3</sup> (BASIC Subsystem)	60.28	198.74
HP3000 II <sup>3</sup> (programa compilado)	2.17	5.81

1. Poniendo a masa el nodo A de la Figura 1.
2. Utilizado por un usuario.
3. Utilizado por cuatro usuarios.

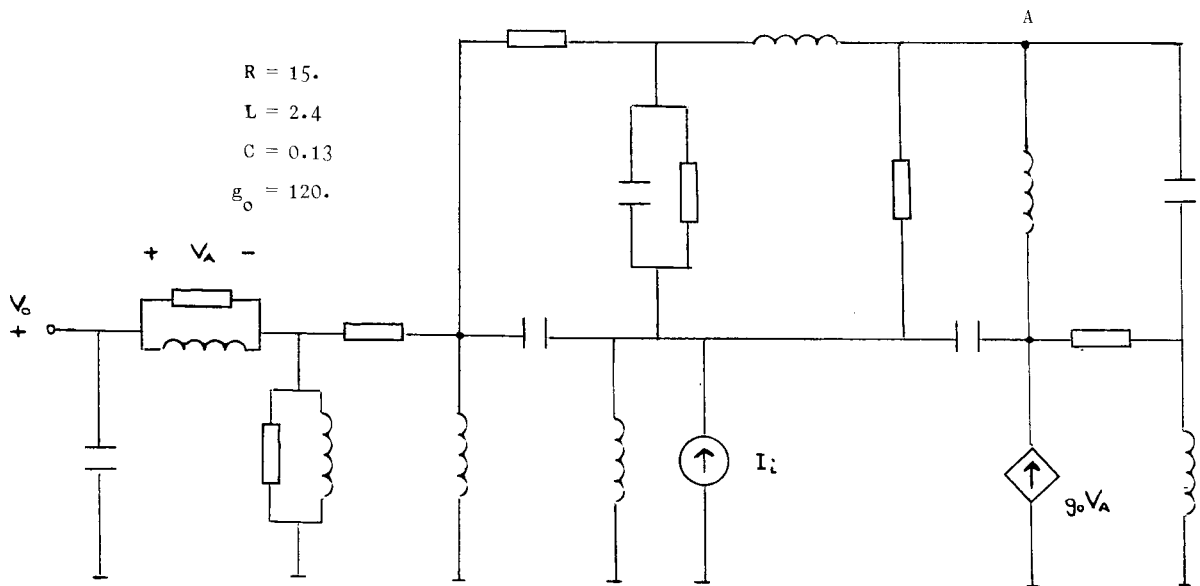


Fig. 1.  
 Red de ensayo de eficiencia temporal de la rutina de cálculo de funciones de red. (8 nodos + masa, 12 mallas + m. exterior, 21 ramas)

noidal rectificada, cuadrada, triangular y -  
 cuyos parámetros descriptivos están almacena-  
 dos en el programa. De no haberse diseñado -  
 el programa con este algoritmo, el único mé-  
 todo de análisis de tales funciones periódicas  
 sería su descomposición en serie de Fourier,  
 originando un método muy poco eficiente en  
 tiempo y aproximación al requerirse la deter-  
 minación de muchos armónicos (un mínimo de  
 5-9) para obtener una exactitud aceptable y  
 al aparecer fenómenos indeseables (efecto de  
 Gibbs). Gracias a la descomposición (3) -  
 es posible la simulación exacta y rápida me-  
 diante la determinación de la transformada -  
 inversa de una función racional y un ciclo -  
 recurrente de superposiciones decaladas en -  
 el tiempo. Obsérvese que como cada superposi-  
 ción decalada debe comenzar en un valor de -  
 tiempo 'muestreado', el valor inicial del --  
 análisis temporal ha de ser 0 seg. y la fre-  
 cuencia de 'muestreo' debe pertenecer a un -  
 intervalo discreto dependiente del número de  
 puntos calculados y del valor final del tiem-  
 po de análisis /16/. La particularización --  
 del tipo de señales de entrada posibles (ver  
 Apéndice A) procedente de la restricción --  
 $c_i = c_{i-1}$  de la expresión (3) no supone una --  
 pérdida de generalidad importante en los ca-  
 sos normales. Por otra parte, dado que los -  
 tramos no deben ser necesariamente lineales  
 sino que pueden ser porciones de otras fun-  
 ciones con transformada de Laplace racional,  
 el tipo de funciones que se pueden especificar  
 en los programas generales de análisis -  
 queda generalizado aquí. En la figura 2 se -  
 ilustra la simulación de la respuesta transi-  
 toria de un circuito de cuarto orden (trans-  
 formador doblemente sintonizado) siendo la -  
 entrada una onda trinagular /1/. Se muestra  
 la etapa de especificación de la señal de en-  
 trada y cálculo de la transformada inversa,  
 pero no se ofrece la parte dedicada al cálcu-  
 lo de la función de red.

Los programas generales de simulación de re-  
 des ofrecen la opción de describir la señal  
 de entrada por tramos lineales (p.e. ANP3 --  
 /18/, SCEPTRE /19/, LISA /2/) o hacen neces-  
 ario el diseño de circuitos no lineales para  
 generar tipos especiales de excitación (ECAP  
 II /20/), u ofrecen la posibilidad de incluir  
 subprogramas hechos por el usuario para la -  
 generación de estímulos (SCEPTRE /19/).

#### 4. EFECTOS SINGULARES POR LA LIMITACION DE - FORMATOS

Aunque los pequeños formatos no se pueden --  
 considerar como un problema típico de la simu-  
 lación en miniordenador pues por regla gene-  
 ral los nuevos productos poseen formatos lar-  
 gos, es sumamente interesante un estudio de  
 los efectos de la limitación del formato so-  
 bre los cálculos en la simulación de redes y  
 de sus posibles correcciones. El formato de  
 almacenamiento en coma flotante del sistema  
 operativo sobre el que se implementó nuestro  
 proyecto (ver 1.1) propicia dicho estudio.

##### 4.1 Reducción de precisión

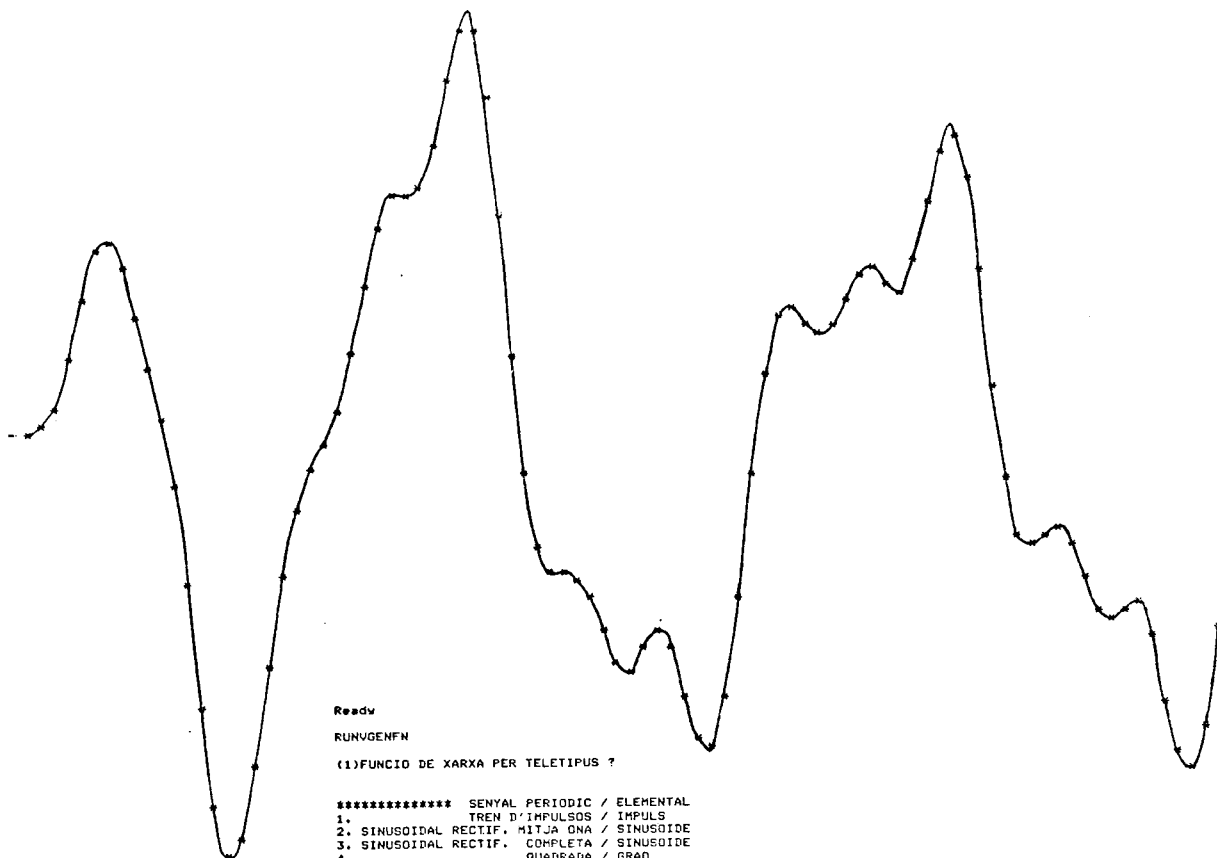
Al acumularse los errores de redondeo a lo -  
 largo de los cálculos, la primera consecuen-  
 cia es la disminución del grado de aproxima-  
 ción con que se obtienen las salidas. Es con-  
 veniente /11/ (aunque no usual en los progra-  
 mas generales) la existencia de procesos de  
 comprobación del grado de precisión de los -  
 cálculos en ciertos puntos para avisar al --  
 usuario, en su caso, de disminuciones impor-  
 tantes de la fiabilidad de las salidas. En -  
 el presente proyecto existe un proceso de com-  
 probación de la exactitud alcanzada en los -  
 procesos de cálculo de polos y ceros (ver Fi-  
 gura 2), avisando en caso de que no se alcan-  
 ce una cota predeterminada. Es un problema -  
 de envergadura la cuantificación de la exac-  
 titud de los resultados obtenidos en general;  
 sólo es tratable por métodos estadísticos y  
 los programas de la segunda generación no la  
 incluyen.

En casos 'patológicos' el efecto de los erro-  
 res de truncamiento o redondeo llega a extre-  
 mos en los que la información de salida pue-  
 de tener errores tan grandes como un 300%. -  
 Normalmente es fácil detectar la aparición -  
 de estos fenómenos por la forma 'aleatoria'  
 de los datos obtenidos.

En la figura 4 se puede observar el efecto -  
 que la limitación del número de cifras signi-  
 ficativas tiene sobre el diagrama de la impe-  
 dancia de entrada del filtro de la figura 3.  
 El deterioro es muy apreciable al variar tan-  
 solo de 9 a 7 cifras. Procede este ejemplo -  
 de la implementación del subprograma de aná-  
 lisis frecuencial en el miniordenador HP 250  
 (formato de 15 cifras). La variación del nú-

PRECISIO >=1 ? 1

TEMPS DE CALCUL (CPU) = 10.7 SEG.



Readv

RUNVGENFN

(1)FUNCIO DE XARXA PER TELETIPUS ?

\*\*\*\*\* SENYAL PERIODIC / ELEMENTAL  
 1. TREN D'IMPULSOS / IMPULS  
 2. SINUSOIDAL RECTIF. MITJA ONA / SINUSOIDE  
 3. SINUSOIDAL RECTIF. COMPLETA / SINUSOIDE  
 4. TRIANGULAR / GRAD  
 5. TRIANGULAR / RAMPA  
 6. DESCRITA PEL USUARI / 1-2-4-5  
 \*\*\*\*\*  
 ? 5

FRECUENCIA DEL SENYAL PERIODIC ? 500E3  
AMPLITUD? 10

FACTOR CONSTANT = .296296E 12  
AIII

\*\*\*\*\* PALS \*\*\*\*\*

1	-820056	+J-	.14007E 8
2	-820056	+J	.14007E 8
3	-846611	+J-	.467534E 7
4	-846611	+J	.467534E 7

MODIFICACIONS ?

ORDRES DE MULTIPLICITAT A ESPECIFICAR ? 1234

1	? 1
2	? 1
3	? 1
4	? 1

\*\*\*\*\* ZEROS \*\*\*\*\*

CAP

PAPER NORMAL<71> / GRAN<125> ? 100

EXACTITUT DEFICIENT DEL PAL (-.8201E 06+J-.1401E 08)  
ERROR DEL DENOMINADOR = (5.8594E-03+J9.7656E-04)

EXACTITUT DEFICIENT DEL PAL (-.8201E 06+J1.4007E 07)  
ERROR DEL DENOMINADOR = (5.8594E-03+J-.9766E-03)

EXACTITUT DEFICIENT DEL PAL (-.8466E 06+J-.4675E 07)  
ERROR DEL DENOMINADOR = (-.3906E-02+J4.8828E-04)

EXACTITUT DEFICIENT DEL PAL (-.8466E 06+J4.6753E 06)  
ERROR DEL DENOMINADOR = (-.3906E-02+J-.4883E-03)

\*\*\*\*\* PAL \*\*\*\*\* RESIDU (PRIMER GRAU) RESIDU (SEGON GRAU)

-8201E 06+J-.1401E 08	-2589E-12+J-.6067E-10	0.0000E 00+J0.0000E 00
-8201E 06+J1.4007E 07	-2589E-12+J6.0667E-11	0.0000E 00+J0.0000E 00
-8466E 06+J-.4675E 07	2.5888E-13+J1.8176E-10	0.0000E 00+J0.0000E 00
-8466E 06+J4.6753E 06	2.5888E-13+J-.1818E-09	0.0000E 00+J0.0000E 00

SUPERPOSICIO ? IE  
CICLE RECURRENT D'ENTRADA PERIODICA ? SI

NOMBRE DE PUNTS ? 90  
.000045 /N = VALOR FINAL  
INTERVAL DE TEMPS ( ) ? 0.5E-6  
INTERVAL DE TEMPS = 0 .000005

TAULA DE VALORS ?

Fig. 2  
Ejemplo de la simulación de la respuesta temporal  
de una red excitada por una onda triangular



mero de cifras efectivas se realiza mediante típicas subrutinas de suma y multiplicación.

#### 4.2 Limitación de magnitud

En el sistema MKSA y en la simulación de redes de parámetros concentrados (hasta UHF) - la magnitud de los exponentes que aparecen - en los análisis sobrepasa 100 frecuentemente. El diseño de algoritmos especiales para efectuar cálculos con números no pertenecientes al intervalo intrínseco del sistema operativo no nos ha resultado eficiente en tiempo - para su empleo en los programas. Para que no se aborten las etapas subsiguientes de análisis hay que tener presente el tratamiento - adecuado de los errores de saturación (under-overflow) en la estructura del programa, - partiendo de la base de que estos errores - provocan siempre una pérdida irrecuperable - de información. En estos casos se asigna arbitrariamente el valor del extremo más próximo del intervalo de valores permitidos a la variable que provoca la saturación del registro. De esta manera, la forma en que queda - alterada la información de salida puede ser radical, por ejemplo, el grado de los polinomios de las funciones de red puede quedar rebajado. De cara a un análisis de los efectos del tratamiento del error descrito sobre el cálculo de funciones de red, se puede modelar el error mediante un filtro lineal en cascada, tal como indica la figura 5.

En muchas ocasiones los coeficientes de los polinomios cuyo exponente es de mayor magnitud son los correspondientes a los términos de mayor grado. Si estos coeficientes no alcanzan su magnitud real o incluso se anulan a causa del tratamiento de los errores de saturación, el 'filtro de error' es plano (a 0 dB) en las frecuencias inferiores, introduciendo distorsión (por lo general, como un - paso bajo) en las frecuencias superiores que son las que influyen principalmente en la - contribución de los términos de mayor grado. En la figura 6 se ilustra este punto. Corresponde a la respuesta frecuencial de un filtro RC en doble T puenteada. En 6.a no se - llevó a cabo normalización previa (Apartado 3.3), lo cual provocó la aparición de errores de saturación al calcular la función de red; en 6.b se representa la respuesta frecuencial real. Vemos, por tanto, que una característica típica en los instrumentos del laboratorio de experimentación cual es la limitación del ancho de banda tiene su imagen correspondiente en la simulación en ordenador en ciertas condiciones.

Para contrarrestar este efecto no parece aconsejable una ecualización adaptativa dada la complejidad y alinealidad de las fuentes de error /17/, siendo preferible la prevención de los errores de redondeo y saturación mediante el tratamiento previo de la información de entrada que se describe en el siguiente apartado.

$L_1 = 1.03 \text{ mH}$	$C_1 = 21 \text{ pF}$
$L_2 = 0.5 \text{ mH}$	$C_2 = 285 \text{ pF}$
$R = 72$	$C_3 = 36 \text{ pF}$
	$C_4 = 101 \text{ pF}$

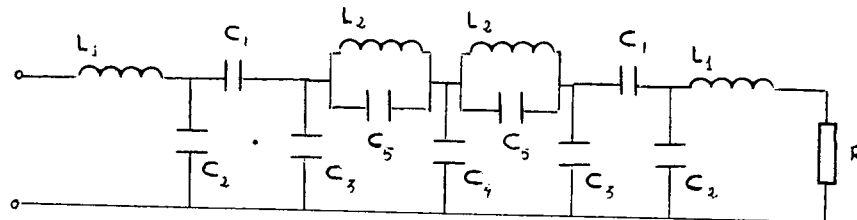
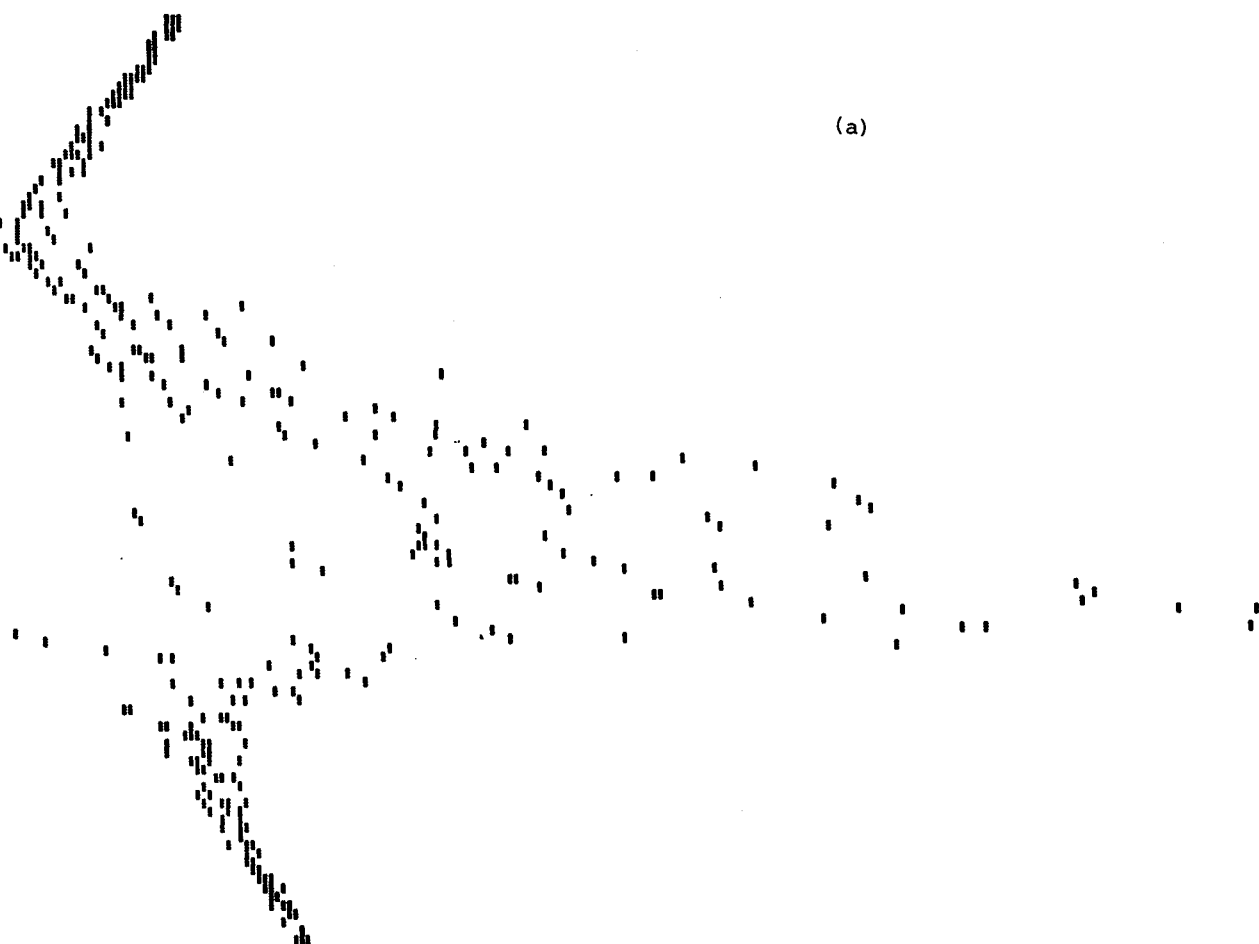


Fig. 3  
Filtro LC en escalera simétrico

272000

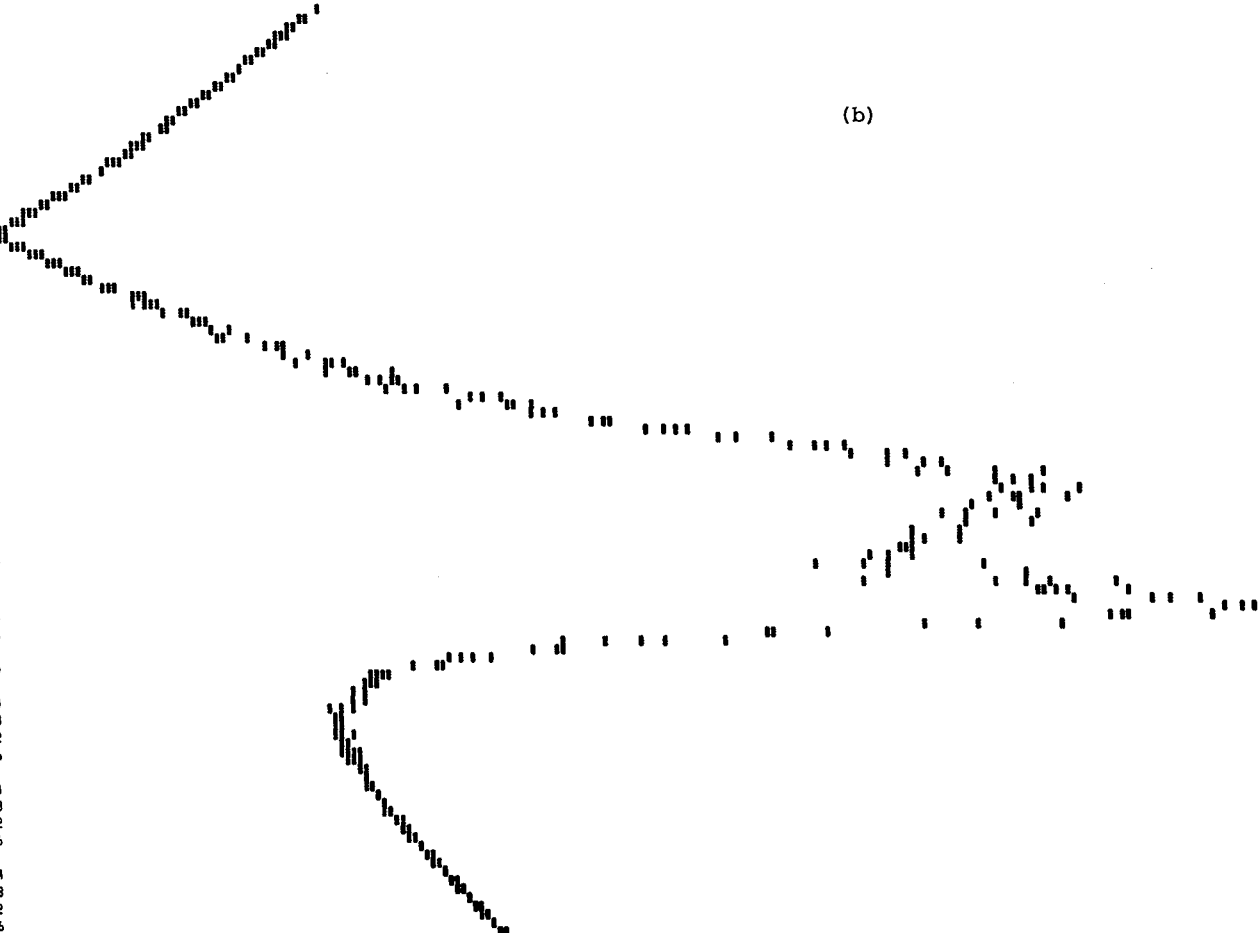
272563.636364  
 273127.272728  
 273691.909092  
 274254.545456  
 274818.18182  
 275381.818184  
 275945.454548  
 276509.898912  
 277072.727276  
 277636.36364  
 278200.000004  
 278763.636368  
 279327.272732  
 279891.909096  
 280454.54546  
 281018.181824  
 281581.818188  
 282145.454552  
 282709.898916  
 283272.72728  
 283836.363644  
 284400.000008  
 284963.636372  
 285527.272736  
 286091.9091  
 286654.545464  
 287218.181828  
 287781.818192  
 288345.454556  
 288909.89892  
 289472.727284  
 290036.363648  
 290600.000012  
 291163.636376  
 291727.27274  
 292291.909104  
 292854.545468  
 293418.181832  
 293981.818196  
 294545.45456  
 295109.898924  
 295672.727288  
 296236.363652  
 296800.000016  
 297363.63638  
 297927.272744  
 298491.909108  
 299054.545472  
 299618.181836  
 300181.8182  
 300745.454564  
 301309.898928  
 301872.727292  
 302436.363656



(a)

272000

272563.636364  
 273127.272728  
 273691.909092  
 274254.545456  
 274818.18182  
 275381.818184  
 275945.454548  
 276509.898912  
 277072.727276  
 277636.36364  
 278200.000004  
 278763.636368  
 279327.272732  
 279891.909096  
 280454.54546  
 281018.181824  
 281581.818188  
 282145.454552  
 282709.898916  
 283272.72728  
 283836.363644  
 284400.000008  
 284963.636372  
 285527.272736  
 286091.9091  
 286654.545464  
 287218.181828  
 287781.818192  
 288345.454556  
 288909.89892  
 289472.727284  
 290036.363648  
 290600.000012  
 291163.636376  
 291727.27274  
 292291.909104  
 292854.545468  
 293418.181832  
 293981.818196  
 294545.45456  
 295109.898924  
 295672.727288  
 296236.363652  
 296800.000016  
 297363.63638  
 297927.272744  
 298491.909108  
 299054.545472  
 299618.181836  
 300181.8182  
 300745.454564  
 301309.898928  
 301872.727292  
 302436.363656



(b)

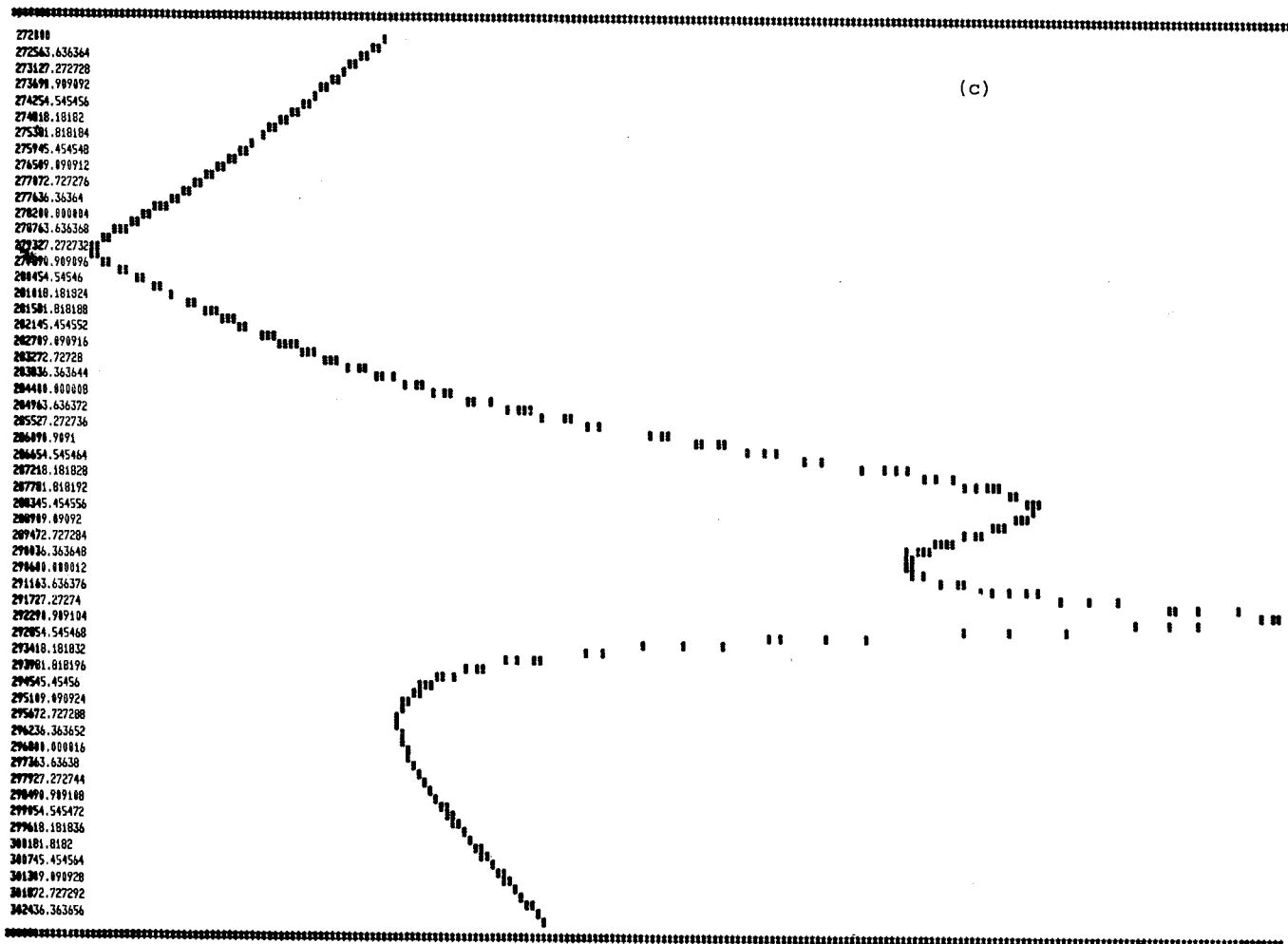


Fig. 4  
 "Ruido" introducido en el análisis frecuencial por  
 el redondeo, con 7 (a), 8 (b) y 9 (c) cifras significativas

Tabla 3  
Posibilidades de normalización/desnormalización  
con los datos de entrada y salida

	OUTPUT	MKSA	SISTEMA COHERENTE	RESULTADOS NORMALIZADOS	
	INPUT				
	MKSA	DIRECTO N/D (1)	NORMALIZACION (2)	NORMALIZACION (2)	
	SISTEMA COHERENTE	DESNORMALIZACION	DIRECTO N/D (1)	NORMALIZACION (2)	
	RED NORMALIZADA (TEORICA)	DESNORMALIZACION	DESNORMALIZACION	DIRECTO	

- (1). Para prevenir errores  
(2). No suele tener utilidad

#### 4.3 Normalización

Mediante la normalización clásica de dos parámetros -resistencia y frecuencia- de los valores de los componentes de la red (la normalización del tercer parámetro (tensión o intensidad) no ofrece utilidad porque únicamente afecta al escalado de los datos de entrada y salida), se rebaja el orden de la magnitud de los exponentes y sus diferencias relativas, lo cual previene los errores de saturación y mitiga los efectos de los errores de redondeo. En el proyecto se efectúa la normalización sobre las matrices de admitancia o impedancia (nodos o mallas) en vez de sobre los valores de los componentes, pa-

ra reducir el número de cálculos, y la desnormalización de salida sobre las funciones transformadas (en el análisis temporal), y sobre el escalado de los ejes de frecuencia y, en su caso, de magnitudes dimensionales -impedancia/admitancia- (en el análisis frecuencial).

Dado que el programa no supone que los datos de entrada están referidos al sistema MKSA - se pueden formular por el usuario en otros sistemas de unidades coherentes (/1/ Apéndice B., /19/), lo cual supone en sí una normalización previa. También se puede emplear conjuntamente un sistema de unidades coherentes con normalización y/o desnormalización -

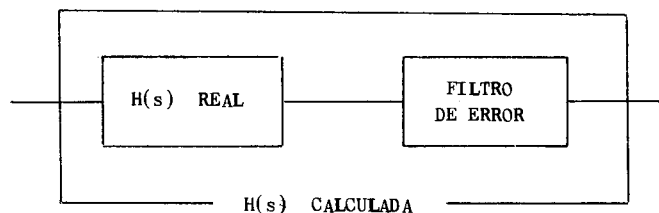


Fig. 5  
Modelado del error introducido en el cálculo de la  
función de red debido a saturaciones de variables

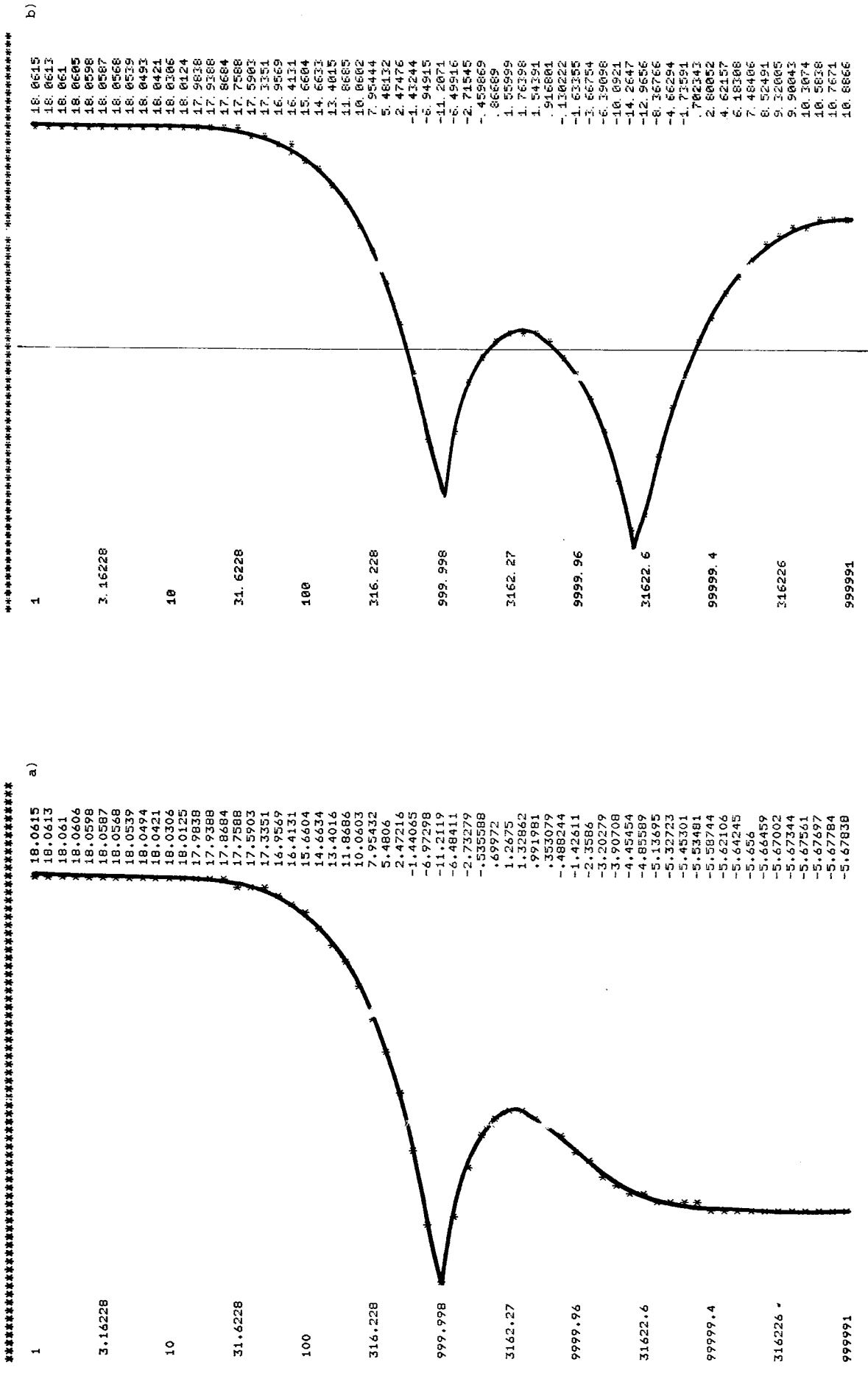


Fig. 6 \*\*\*\*\*

Diagrama de ganancia (dB) de un filtro RC en doble T puenteados: (a) sin normalizar los datos de entrada, (b) con datos de entrada normalizados.

automática para:

- (a) reducir la probabilidad de aparición de errores
- (b) referir los resultados al sistema MKSA.

Las posibilidades existentes se resumen en - la Tabla 3.

El programa efectúa automáticamente procesos de desnormalización y de normalización/desnormalización. En el caso inusual de requerir normalización únicamente, se procedería a una desnormalización con parámetros inversos de los originales. Como se observa en la Tabla 3, además de combatir los errores, la incorporación de este proceso posibilita la simulación de redes teóricas (procedentes a menudo de síntesis) en su dominio (o dominios) de unidades reales de trabajo.

Algunos programas generales de simulación de redes, incorporan procesos paralelos al aquí descrito pero, en general, sin permitir la elección de la opción deseada u óptima. Por ejemplo, CORNAP /21/ permite la desnormalización de dos parámetros, SCEPTRE /19/ admite redes en sistemas coherentes sin llevar a cabo procesos de normalización de datos y ANP3 /18/ incorpora etapas de corrección de datos de entrada.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha presentado el programa, justificando - especialmente sus características distintas de las normalmente adoptadas: análisis dual, resolución por matrices racionales, análisis temporal por transformación de Laplace con estímulos periódicos mediante ciclos de superposiciones decaladas, los procesos introducidos para contrarrestar la limitación de formatos, y la versatilidad de las opciones de normalización/desnormalización. Asimismo, en cada uno de estos puntos se ha mencionado las soluciones adoptadas por los programas - generales de simulación de redes, especialmente los que se hallan a nuestro alcance a través del terminal conectado con el CPDME - existente en el Centro de Cálculo de la Universidad Politécnica de Barcelona.

Aunque debido a la continuada mejora de las características de los nuevos pequeños orde-

nadores, el proyecto sea cada vez menos representativo de los problemas que surgen al diseñar los programas de este tipo, debe seguir siendo válido como referencia de los -- efectos (y sus posibles soluciones) originados por los errores de redondeo y saturación, no privativos -aunque sí más importantes- de los pequeños sistemas.

Como líneas subsiguientes de investigación - tenemos, principalmente, la generación de -- funciones de red simbólicas (base de programas de optimización) y el estudio de la implementación en microprocesador de rutinas - específicas de análisis temporal y frecuencia semejantes a las descritas aquí.

## 6. RECONOCIMIENTOS

Queremos patentizar la gratitud debida al -- Grupo de Servotecnia/Electrotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Tele comunicación de Barcelona por el apoyo e interés mostrados por el proyecto que ha dado lugar al presente artículo, y al Departamento de Sistemas de Ordenadores de Hewlett-Packard Barcelona por la colaboración prestada para la utilización de sus equipos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- /1/ HERRANZ, J., MIRO, J.M., PUERTA, A., VERDU, S. "Introducción al CAD. I. Simulación de Redes Lineales". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. U.P.B. Barcelona. 1978.
- /2/ KAPLAN, G. "Computer Aided Design". IEEE Spectrum. Oct. 1975.
- /3/ LACROIX, M. "Comparaison des programmes d'analyse générale des circuits électriques". Revue Technique Thomson-CSF. Vol. 6, Mar. 1974.
- /4/ FALK, H. "A checkup: minicomputer software". IEEE Spectrum. Feb. 1974.
- /5/ HUELSMAN, L.P. "Basic Circuit Theory -- with Digital Computations". Prentice-Hall 1972.
- /6/ HUELSMAN, L.P. "Digital Computations in Basic Circuit Theory". Mc. Graw-Hill. 1968.

- /7/ IÑIGO, R. "Teoría moderna de Circuitos Eléctricos". Ed. Pirámide. 1977.
- /8/ HEBENSTREIT, J. "Nuevas tendencias en la enseñanza asistida por ordenador". - Novática. Sept./Oct. 1978 u original en QUESTIÓ, vol. 3, nº 3. 1978.
- /9/ CASTELLS, J., ARTES, J., JAEN, J.A. "La enseñanza asistida por ordenador en España". Novática. Sept./Oct. 1978.
- /10/ CALAHAN, D.A. "Computer Aided Network Design". Mc. Graw-Hill. 1968.
- /11/ KUO, F.F., KAISER, J. "System Analysis by Digital Computer". Wiley, 1966.
- /12/ POTTLE, C. "A 'textbook' computerized - state-space network analysis algorithm". First IEEE International Circuit Theory Symposium. 1968.
- /13/ BILLES, A. "Un programme de simulation de circuits électroniques". Electronique Applications nº 4 Hiver 1977-78.
- /14/ CNAP. "Calculator Network Analysis Program". Hewlett-Packard Series 9800 Software.
- /15/ H.P. Basic Users Club. Network Analysis Program (10 nodos; 14 kb).
- /16/ LIOU, M.L. "Response of Linear, Time-invariant Systems due to Periodic inputs". IEEE Proc. Feb. 1967.
- /17/ OPPENHEIM, A.V., SCHAFER, R.W. "Digital Signal Processing". Cap. 9. Prentice-Hall. 1975.
- /18/ ANP3 User's Manual. Laboratory of Circuit Theory. Technical University of Denmark. 1972.
- /19/ BOWERS, J.C., SEDORE, S.R. "SCEPTRE. A Computer program for Circuit and Systems Analysis". Prentice-Hall. 1971.
- /20/ JENSEN, R.W., LIEBERMAN, M.D. "IBM Electronic Circuit Analysis Program". Prentice-Hall, 1968.
- /21/ CORNAP. System Theory Research Group. -

School of Electrical Engineering. Cornell University.

/22/ PENFIELD, P. Jr., "Martha User's Manual" MIT Press. 1971.

/23/ BESSER, L. "Compact". Tymshare Manual. Tymcom-X, 1975.

## 8. APENDICE A

"Sistematización de la determinación de la respuesta de una red a una excitación de tramos lineales en función de su respuesta a la rampa".

Sea el escalón unitario  $u(t)$  y la rampa unitaria  $r(t)=t.u(t)$ , suponiendo que en el instante de tiempo  $t_i$  la función de excitación vale  $y_i$  y que en  $t_{i-1}$  vale  $y_{i-1}$ , el tramo lineal que une ambos puntos se produce por la superposición de la señal:

$$s_i(t) = \left[ r(t-t_{i-1}) - r(t-t_i) \right] \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

Si la señal arbitraria de tramos lineales -- viene descrita por una sucesión de pares --  $(t_i, y_i)$  que incluye todos los puntos no derivables y cuyo primer término es el origen, se puede poner como superposición ponderada y decalada en el tiempo de la función  $s_i(t)$  generalizada'.

En los puntos en los que existe discontinuidad de la función se deben incluir dos pares:

$$(t_{i-1}, y_{i-1}) \quad \vee \quad (t_i, y_i)$$

tal que

$$t_{i-1} = t_i^-$$

$$y_{i-1} = f(t_i^-)$$

$$y_i = f(t_i^+),$$

lo cual hace necesario (para salvar la indeterminación de la expresión) generalizar la función  $s_i(t)$ . Teniendo en cuenta que (sin discontinuidad en  $t_i$ ):

$$s_i(t) = \begin{cases} 0 & t < t_{i-1} \\ (y_i - y_{i-1}) \frac{t - t_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} & t_{i-1} < t < t_i \\ y_i - y_{i-1} & t_i < t \end{cases}$$

en el caso de discontinuidad ( $t_i = t_{i-1}$ ) la segunda condición desaparece y queda:

$$s_i(t) = (y_i - y_{i-1}) \cdot u(t - t_i)$$

Por tanto, con  $(t_0, y_0) = (0, 0)$ , hay que superponer una función  $s_i(t)$  para cada par  $(t_i, y_i)$  de forma que,

$$s_i(t) = \begin{cases} \frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} [r(t - t_{i-1}) - r(t - t_i)] & t_i \neq t_{i-1} \\ (y_i - y_{i-1}) \cdot u(t - t_i) & t_i = t_{i-1} \end{cases}$$

Consecuentemente, si se conoce la respuesta  $b(t)$  de la red a la rampa (y de ahí fácilmente la respuesta al escalón  $a(t) = \dot{b}(t)$ ) se halla mediante sumas ponderadas la respuesta a cualquier excitación lineal a tramos, porque por la linealidad e invarianza de la red, si  $T[\underline{f}(t)]$  es la respuesta de la red a  $f(t)$ , se puede poner en la forma:

$$T \left[ \sum_1^N s_i(t) \right] = \sum_1^N k_i a(t - t_i) + \sum_1^N k'_i b(t - t_i)$$

con  $k_i, k'_i$  dependientes de la sucesión de los  $N$  pares ordenados a través de la expresión de  $s_i(t)$ .