C.N.E.A. Biblioteca
ARCHIVO PUBLICACIONES
Nº 2 AÑO 1982

00.82.17

ANALISIS DE LAS TOLERANCIAS UTILIZANDO TECNICAS DE MONTE CARLO

José Luis ROCA
Ignacio Barnardo MAYANS

Comisión Nacional de Energía Atómica

Gerencia de Desarrollo

Depto. Instrumentación y Control

INTRODUCCION:

El análisis de las tolerancias en redes de varios componentes durante la faz de proyecto se presenta a veces tan complejo que en la mayoría de las ocasiones es dejada de lado. Ello es por motivos tales como:

- Cada componente lleva asociada una función de distribución de probabilidad distinta.
- El conjunto presenta un comportamiento difícil de predecir, como resultado del punto anterior.
- La presentación gráfica del problema que mostraría claramente la situación del sistema bajo estudio es de realización muy laboriosa.

Mediante la utilización de técnicas de computación es posible reducir al mínimo estos inconvenientes.

El problema clásico surge cuando se pretende producir "n" unidades de un determinado sistema electrónico y se desea que, fijadas las tolerancias de los componentes, la performance de toda la producción esté concentrada alrededor de un punto óptimo adecuado.

En muchas ocasiones, la distribución de valores dentro de las tolerancias dadas determinan en el conjunto total la presencia de dos puntos óptimos en lugar de uno, con la consiguiente indeterminación en la producción, una parte de la cual tendrá una performance completamente distinta de la otra.

En el presente análisis se han utilizado programas del sistema de Cómputos I.B.M. - 360, propuestos por K.J. DIESTLER, de la Universidad de KENTUCKY (Depto. de Ing. Eléctrica), todos en Fortran IV (1). Asimismo, se ha utilizado el sistema de Cómputos del Centro de Cómputos de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

METODO DE MONTE CARLO:

Históricamente el método se denominó "Random Walks" (caminos al azar) y cobró extraordinaria fuerza durante la segunda guerra mundial. Von NEUMANN y ULAM fueron quienes le dieron el nombre que lleva actualmente.

La base de esta nueva forma de encarar la resolución de problemas es la siguiente:

Sea una función de n variables:

$$y = f\,(x_1,\ x_2,\ x_3, \ldots\ldots\ldots x_n)$$

///

///

En esta función "y" será variable dependiente y x_i (i = 1, 2,.....n) variables independientes.

Si las variables "x_i" son conocidas, también será conocido el valor de "y". En este caso se estará en presencia de un problema determinístico donde, fijados los valores de las variables independientes, queda fijo el valor de la variable dependiente.

Cuando x_i (i = 1, 2,.....n) son desconocidas, se está ante un problema estadístico y estas variables se denominan estocásticas.

Lo único que es conocido es la probabilidad de que ellas tomen sus diferentes valores. Entonces "y" no será una variable fija (con un sólo valor) y podrá tener varios posibles valores.

Siguiendo a L.M. FLANDERS Jr., el método de Monte Carlo permite determinar la probabilidad de que la variable 'y" adopte sus distintos valores (2).

Esto es posible realizarlo haciendo que la variable "x" o las variables "x_i" tomen valores al azar, de acuerdo a una determinada distribución de frecuencias de la variable dependiente "y", para luego analizar el resultado. Es esencialmente una "simulación con condiciones de frontera prescriptivas" (3)

Como punto de partida es entonces necesario disponer de un generador de números aleatorios (Fig. 1.). Este generará valores de la variable "x_i" de acuerdo a una distribución prefijada.

Existen varios métodos para generar estos números denominados, en general, "pseudoaleatorios" (4)

La más importante de estas técnicas es la llamada "de las congruencias"*. Su base es la siguiente relación recurrente:

(I) $x_i = x_{i-1} \cdot a + c \ (\text{mód. } m)$

Siendo:

x_i= número pseudoaleatorio

a, c, x_{i-1}= enteros entre 0 y m-1

m= cantidad que prefija el periodo de recurrencia

La operación:

(II) h= c (mód.m)

Implica que h y c son congruentes de módulo m. Esto ocurre cuando h y c dan el mismo resto al ser divididos por m. Por ejemplo:

5590 = 6 (mód. 8)

Pues:

5590 - 6 = 5584 y
5584 / 8 = 698 (resto = 0)

La referencia (4) aclara todo lo enunciado precedentemente. Este método provee números pseudoaleatorios de ditribución uniforme con límites prefijados (Fig. 2a y 2b).

*Una subrutina Fortran del sistema I.B.M. 360, la "RANDU", provee de un generador de números pseudoaleatorios de distribución uniforme de límites cero y uno (Fig. 3) en base al método citado

Esta subrutina debe ser alimentada por un número entero cual-

///

quiera al azar, impar de no más de 9 dígitos "IX". "IY" es el número aclaratorio requerido para la próxima entrada o llamada de la subrutina; "YFL" es el número aleatorio entre cero y uno con distribución uniforme.

Transformación inversa:

Para generar una distribución cualquiera entre límites prefijados se puede partir de la distribución uniforme vista anteriormente utilizando el método de "Transformación Inversa".

Si f(x) es la función densidad de probabilidad y F(x) es la función de distribución acumulativa (Fig.4). Entonces ahciendo:

(III) $F(x) = r$

y luego:

(IV) $x = F^{-1}(r)$

se obtiene la transformación inversa de F(x) tal que si "r" está uniformemente distribuido entre cero y uno, "x" estará distribuido de acuerdo a la "F" acumulativa.

Supóngase que se requiere obtener números uniformemente distribuidos entre los límites "a" y "b" (Fig.2a y 2b). F(x) será:

$F(x) = \frac{x-a}{x-b}$ y $0 < F(x) < 1$

Aplicando la (III) y la (IV) se tiene:

$r = \frac{x-a}{x-b}$

y

$x = a + (b-a) \cdot r$ con $0 < r < 1$

A modo de segundo ejemplo supóngase ahora que se necesita disponer de valores de variable pseudoaleatorios con distribución exponencial (Fig.5). F(x) será:

$F(x) = \exp. (- \lambda \cdot x)$

Aplicando la (III) y la (IV) nuevamente:

$r = \exp. (- \lambda \cdot x)$

y

$x = - \lambda^{-1} \cdot \ln \cdot r$ con $0 < r < 1$

~~Mediante transformación~~ inversa el Conjunto de Subrutinas Científicas I.B.M. 360 provee una subrutina, la "GAUSS" (Fig.6). En ésta "IX", al igual que la "RANDU", es un número impar de menos de 9 dígitos. "S" es la desviación standard; "AM" es el valor medio o nominal y "V"es

///

el valor de la variable de distribución gaussiana.

Cualquier otra distribución puede simularse de igual forma. A título ilustrativo en la Fig.7 se dan las subrutinas "GAMMA", "WEIBULL" "EXP" y "UNIFORM"..

Análisis preliminar:

En todo componente viene especificado la tolerancia T% en por ciento generalmente junto con el valor nominal de la característica del componente X. Esta característica tiene un valor mínimo $\underline{X}$ y un valor máximo $\overline{X}$ de acuerdo a:

$$(V) \qquad \overline{X} = X\,(1 + T) \qquad \underline{X} = X\,(1 - T) \qquad \text{con } T = \frac{T\%}{100}$$

El valor real del componente fluctuará entonces entre $\underline{X}$ y $\overline{X}$:

$$(VI) \qquad \underline{X} \leq x \leq \overline{X}$$

Es posible colocar "x" como función del valor nominal "X", la tolerancia "T", y un parámetro "r" tal que $0 \leq r \leq 1$ con distribución uniforme. Esto es posible a partir del conocimiento de la F(x) acumulativa Fig.8:

$$F(x) = \frac{x - \underline{X}}{\overline{X} - \underline{X}} = \frac{x - X\,(1 - T)}{2.T.X}$$

Aplicando la (III) y la (IV), se tiene:

$$x = X\,(1 - T) + 2\,.\,T\,.\,r$$

Con $0 \leq r \leq 1$

Ahora bién, si la distribución no es uniforme, se utilizará otra subrutina, la "GAUSS" por ejemplo o cuálquiera de las de la Fig.7 que se adapte mejor a la realidad del problema.

En este punto debe tenerse en cuenta la relación existente entre tolerancia del componente y la desviación standard correspondiente. En general son tres clases (Fig.9) en que se pueden clasificar los dispositivos. Para cada una de estas clases los límites a tener en cuenta en lo que respecta a tolerancias son variables de acuerdo a la situación del componente en el mercado y del proceso de "Quality Assurance" seguido. (5).

Esto es muy importante sobre todo cuando existe gran cantidad de componentes involucrados en el sistema a analizar. El conjunto variará notablemente su perfomance de acuerdo a ello.

Representación gráfica:

Para representar graficamente el problema y sus soluciones se ha optado por "plottear" un histograma de 10 columnas iguales, llenando

///

con asteriscos cada una de ellas hasta una altura proporcional a la ordenada del gráfico de distribución.

Para seleccionar un número cualquiera en una de las diez categorías correspondientes a cada columna, se utilizó la subrutina Fortran "SORT" (Fig.10).

En la misma:

Z = es el número ha ser clasificado.
M = es el vector de 10 columnas ha ser cargado.
AMIN, AMAX = son los valores extremos de la variable Z.

Cargado el vector M(10) con sus valores respectivos, la subrutina Fortran "HIST" (Fig.11) se encarga de dibujar el histograma.

En ella:

MAX = es la máxima altura del histograma. Si no se conoce (MAX = 0) la misma subrutina se encarga de encontrar el máximo del vector M.

M = es el vector de 10 columnas cargado ha ser plotteado.

Las coordenadas de la base del histograma son escritas de acuerdo al formato 103. El mismo debe ser cambiado según los valores a plottear. El número sobre las columnas indica la cantidad de elementos que caen dentro de esa columna.

Ejemplos de aplicación:

Ejemplo 1:

Supóngase que se deben fabricar 1000 divisores resistivos del tipo de la Fig.12. La característica de un divisor resistivo es su transferencia:

$$\text{RATIO} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)}$$

Si se asumen distribuciones uniformes para R_1 y R_2, el cómputo de la distribución de valores de "RATIO" puede realizarse a través del programa principal de la Fig.11. Este es alimentado con valores de R_1, R_2, T_1 , T_2 de acuerdo a los formatos 222, 223, 224, 225, 226, 333 y 444. Los histogramas correspondientes para R_1 = 10 K y R_2 = 6 K8 con distintas tolerancias y considerando distribuciones uniformes para ambos resistores pueden observarse en las Figs. 13 y 14.

Ejemplo 2:

Sea una red RC (filtro pasa bajo) (Fig.15). El cómputo de la distribución de la constante de tiempo T = RC del circuito para 500 unidades, puede realizarse asumiendo distribución uniforme para R y distribución gaussiana para C mediante el programa principal de la Fig.16. Para R = 500 K y C = . 01 μF con tolerancia 10%. Los resultados pueden observarse en las Figs. 17, 18 y 19.-

///

En la Fig.17 se han considerado capacitores de alta calidad (clase 1), en la Fig.18 Clase 2 y en la Fig.19 Clase 3. Observese la diferencia en las distribuciones para iguales límites de constantes de tiempo.

Ejemplo 3:

Sea un amplificador inversor implementado con un operacional 741 (Fig.20) donde la amplificación Vo/Vi viene dada por la siguiente expresión:

$$As = \frac{R_5 (R_4 + R_1) - A (R_4 R_3)}{(R_3 + R_5)(R_4 + R_1) + R_2 (R_3 + R_5 + R_4 + R_1) + A R_4 R_2}$$

Con los valores máximos de los parámetros del operacional y suponiendo las siguientes distribuciones:

R_4; distribución uniforme; 0,3 MΩ < R_4 < 1 MΩ

A ; distribución uniforme; 50.000 < A < 200.000

R_5; distribución normal; m = 75 Ω; v = 10 Ω

R_1; 1 K; 10%; v = 10%; $\gamma = 0$; $\beta = 2$; η = 296,43682 Ω

R_2; idem R_1.

R_3; 100 K; 10%; v = 10%; $\gamma = 0$; $\beta = 3$; η = 103.092,78 Ω

Se tiene el histograma de la Fig.22 como resultado de la aplicación del método de Monte Carlo a la implementación de 1.000 circuitos de las características dadas mediante programa principal de Fig.23.

CONCLUSION:

En el presente trabajo se ha propuesto un método eficiente para analizar la influencia de las tolerancias y de la distribución de valores dentro de ellas, en sistemas electrónicos mas o menos complejos. Los ejemplos son fácil muestra de la potencialidad de esta técnica.

Su extensión a sistemas de más componentes es casi inmediata.

///

Referencias:

(1) System/360 Scientific Subroutine Package-Version III - Programmer's Manual. GH-30-0205-4.

(2) "Statistical Processes and Reliability Engineering" - Cherafas Dimitris - Princeton N.J. - D. Van Nostrand 1960.

(3) "El arte de la simulación" - Tocher K.D. - Princeton N.J. - D. Van Nostrand 1963.

(4) "Técnicas de simulación en computadoras" - Thomas Taylor, Joseph Balintfy, Donald Burdick and Kong Chu - Ed. Limusa - Wiley S.A. México.

(5) "Probabilistic Reliability - An Engineering Approach" - M.L. Shooman - Mc Graw Hill Inc. 1968 N.Y.

Relación entre tolerancia y desviación standard:

CLASE	TIPO DE COMPONENTE	RELACION
1	Componentes militares de alta calidad	$\mu = N$, $3\sigma = T.N$
2	Situación intermedia	$\mu = N$, $2\sigma = T.N$
3	Componentes comerciales	$\mu = N$, $\sigma = T.N$

N = valor nominal

μ = valor medio

σ = desviación standard

T = tolerancia (%)/100

Fig. 9

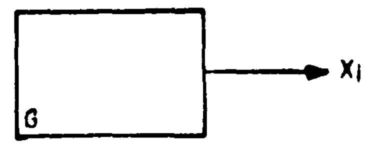


Fig 1

$\tilde{X} = X(1+T)$

: $\underline{X} = X(1-T)$

$F(x) = \frac{x - \underline{X}}{\tilde{X} - \underline{X}} = \frac{x - X(1-T)}{2TX}$

$x = X(1-T) + 2Tr$

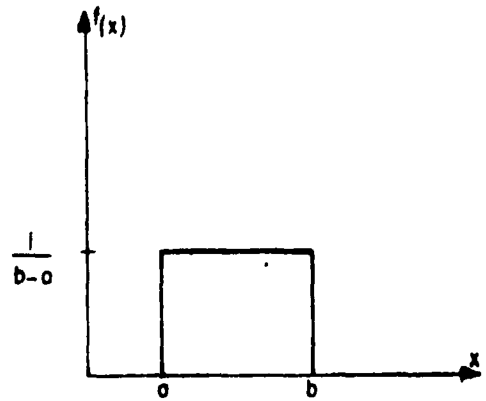


Fig 2a

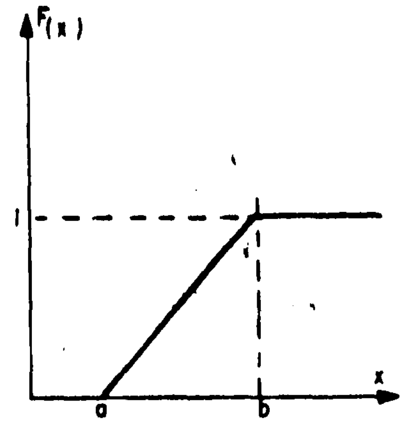


Fig.2b

$F(x) = r$

$x = F^{-1}(r)$

$F(x) = \frac{x-a}{b-a}$

$x = a + (b-a)r$

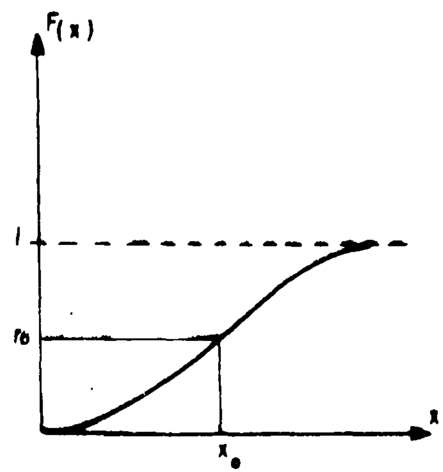


Fig 4

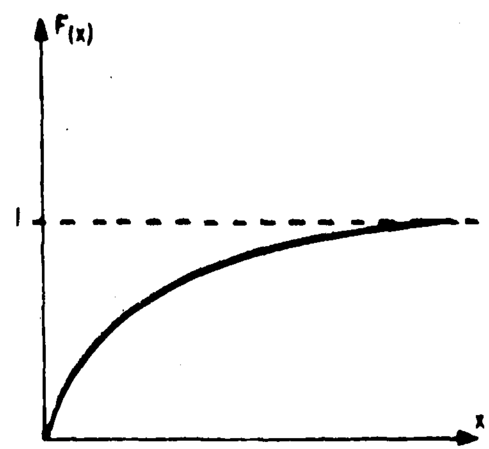


Fig. 5

$F(x) = e^{-\lambda x}$

$x = -\lambda^{-1} \ln r \quad 0 \leq r \leq 1$

```
C                                                                       RAN00020
C    ...............................................................    RAN00030
C        SUBROUTINE RANDU                                               RAN00040
C                                                                       RAN00050
C        PURPOSE                                                        RAN00060
C           COMPUTES UNIFORMLY DISTRIBUTED RANDOM REAL NUMBERS BETWEEN  RAN00070
C           0 AND 1.0 AND RANDOM INTEGERS BETWEEN ZERO AND              RAN00080
C           2**31. EACH ENTRY USES AS INPUT AN INTEGER RANDOM NUMBER    RAN00090
C           AND PRODUCES A NEW INTEGER AND REAL RANDOM NUMBER.          RAN00100
C                                                                       RAN00110
C        USAGE                                                          RAN00120
C           CALL RANDU(IX,IY,YFL)                                       RAN00130
C                                                                       RAN00140
C        DESCRIPTION OF PARAMETERS                                      RAN00150
C           IX - FOR THE FIRST ENTRY THIS MUST CONTAIN ANY ODD INTEGER  RAN00160
C                NUMBER WITH NINE OR LESS DIGITS. AFTER THE FIRST ENTRY,RAN00170
C                IX SHOULD BE THE PREVIOUS VALUE OF IY COMPUTED BY THIS RAN00180
C                SUBROUTINE.                                            RAN00190
C           IY - A RESULTANT INTEGER RANDOM NUMBER REQUIRED FOR THE NEXTRAN00200
C                ENTRY TO THIS SUBROUTINE. THE RANGE OF THIS NUMBER IS  RAN00210
C                BETWEEN ZERO AND 2**31                                 RAN00220
C           YFL- THE RESULTANT UNIFORMLY DISTRIBUTED, FLOATING POINT,   RAN00230
C                RANDOM NUMBER IN THE RANGE 0 TO 1.0                    RAN00240
C                                                                       RAN00250
C        REMARKS                                                        RAN00260
C           THIS SUBROUTINE IS SPECIFIC TO SYSTEM/360 AND WILL PRODUCE  RAN00270
C           2**29 TERMS BEFORE REPEATING.  THE REFERENCE BELOW DISCUSSESRAN00280
C           SEEDS (65539 HERE), RUN PROBLEMS, AND PROBLEMS CONCERNING   RAN00290
C           RANDOM DIGITS USING THIS GENERATION SCHEME.  MACLAREN AND   RAN00300
C           MARSAGLIA, JACM 12, P. 83-89, DISCUSS CONGRUENTIAL          RAN00310
C           GENERATION METHODS AND TESTS.  THE USE OF TWO GENERATORS OF RAN00320
C           THE RANDU TYPE, ONE FILLING A TABLE AND ONE PICKING FROM THERAN00330
C           TABLE, IS OF BENEFIT IN SOME CASES.  65549 HAS BEEN         RAN00340
C           SUGGESTED AS A SEED WHICH HAS BETTER STATISTICAL PROPERTIES RAN00350
C           FOR HIGH ORDER BITS OF THE GENERATED DEVIATE.               RAN00360
C           SEEDS SHOULD BE CHOSEN IN ACCORDANCE WITH THE DISCUSSION    RAN00370
C           GIVEN IN THE REFERENCE BELOW.  ALSO, IT SHOULD BE NOTED THATRAN00380
C           IF FLOATING POINT RANDOM NUMBERS ARE DESIRED, AS ARE        RAN00390
C           AVAILABLE FROM RANDU, THE RANDOM CHARACTERISTICS OF THE     RAN00400
C           FLOATING POINT DEVIATES ARE MODIFIED AND IN FACT THESE      RAN00410
C           DEVIATES HAVE HIGH PROBABILITY OF HAVING A TRAILING LOW     RAN00420
C           ORDER ZERO BIT IN THEIR FRACTIONAL PART.                    RAN00430
C                                                                       RAN00440
C        SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED                  RAN00450
C           NONE                                                        RAN00460
C                                                                       RAN00470
C        METHOD                                                         RAN00480
C           POWER RESIDUE METHOD DISCUSSED IN IBM MANUAL C20-8011,      RAN00490
C           RANDOM NUMBER GENERATION AND TESTING                        RAN00500
C                                                                       RAN00510
C    ...............................................................    RAN00520
C                                                                       RAN00530
      SUBROUTINE RANDU(IX,IY,YFL)                                       RAN00540
      IY=IX*65539                                                       RAN00550
      IF(IY)5,6,6                                                       RAN00560
    5 IY=IY+2147483647+1                                                RAN00570
    6 YFL=IY                                                            RAN00580
      YFL=YFL*.4656613E-9                                               RAN00590
      RETURN                                                            RAN00600
      END                                                               RAN00610
```

FIG. 3

FILE: GAUSS   FORTRAN A   CNEA - CMS - REL 6 PLC 06

```
C
C     ..................................................................
C
C        SUBROUTINE GAUSS
C
C        PURPOSE
C           COMPUTES A NORMALLY DISTRIBUTED RANDOM NUMBER WITH A GIVEN
C           MEAN AND STANDARD DEVIATION
C
C        USAGE
C           CALL GAUSS(IX,S,AM,V)
C
C        DESCRIPTION OF PARAMETERS
C           IX -IX MUST CONTAIN AN ODD INTEGER NUMBER WITH NINE OR
C                LESS DIGITS ON THE FIRST ENTRY TO GAUSS. THEREAFTER
C                IT WILL CONTAIN A UNIFORMLY DISTRIBUTED INTEGER RANDOM
C                NUMBER GENERATED BY THE SUBROUTINE FOR USE ON THE NEXT
C                ENTRY TO THE SUBROUTINE.
C           S  -THE DESIRED STANDARD DEVIATION OF THE NORMAL
C                DISTRIBUTION.
C           AM -THE DESIRED MEAN OF THE NORMAL DISTRIBUTION
C           V  -THE VALUE OF THE COMPUTED NORMAL RANDOM VARIABLE
C
C        REMARKS
C           THIS SUBROUTINE USES RANDU WHICH IS MACHINE SPECIFIC
C
C        SUBROUTINES AND FUNCTION SUBPROGRAMS REQUIRED
C           RANDU
C
C        METHOD
C           USES 12 UNIFORM RANDOM NUMBERS TO COMPUTE NORMAL RANDOM
C           NUMBERS BY CENTRAL LIMIT THEOREM. THE RESULT IS THEN
C           ADJUSTED TO MATCH THE GIVEN MEAN AND STANDARD DEVIATION.
C           THE UNIFORM RANDOM NUMBERS COMPUTED WITHIN THE SUBROUTINE
C           ARE FOUND BY THE POWER RESIDUE METHOD.
C
C     ..................................................................
C
      SUBROUTINE GAUSS(IX,S,AM,V)
      A=0.0
      DO 50 I=1,12
      CALL RANDU(IX,IY,Y)
      IX=IY
   50 A=A+Y
      V=(A-6.0)*S+AM
      RETURN
      END
```

```
[illegible] EXPO      FORTRAN  A  [illegible]                               PAGE 001

      SUBROUTINE EXPO(IX,[illegible])                                 EXP00010
      CALL RANDU(IX,IY,Y)                                             EXP00020
      IX = IY                                                         EXP00030
      [illegible]                                                     EXP00040
      RETURN                                                          EXP00050
      END                                                             EXP00060

[illegible] UNIF      FORTRAN  A   CNEA - CMS - REL 6 PLC 06            PAGE 001

      SUBROUTINE [illegible]                                          UNI00010
      CALL RANDU(IX,IY,YFL)                                           UNI00020
      IX = IY                                                         UNI00030
      [illegible]                                                     UNI00040
      RETURN                                                          UNI00050
      END                                                             UNI00060

FILE: WEIBUL      FORTRAN  A   CNEA - CMS - REL 6 PLC 06             PAGE 001

      SUBROUTINE WEIBUL (IX,A,B,C,V)                                  WEI00010
      CALL RANDU(IX,IY,V)                                             WEI00020
      IX = IY                                                         WEI00030
      V = [illegible]                                                 WEI00040
      RETURN                                                          WEI00050
      END                                                             WEI00060

FILE: GAMMA       FORTRAN  A   CNEA - CMS - REL 6 PLC 06             PAGE 001

      SUBROUTINE GAMMA(IX,K,A,V)                                      GAM00010
      TR = 1.0                                                        GAM00020
      DO 50 I = 1,K                                                   GAM00030
      CALL RANDU (IX,IY,Y)                                            GAM00040
      IX = IY                                                         GAM00050
   50 TR = TR * Y                                                     GAM00060
      V = -ALOG(TR/A)                                                 GAM00070
      RETURN                                                          GAM00080
      END                                                             GAM00090
```

FIG.7

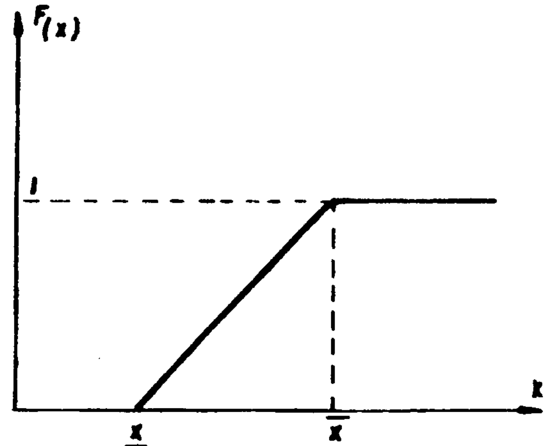
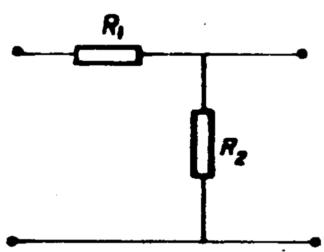
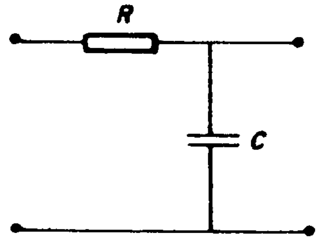


Fig. 8



$$\text{RATIO} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Fig. 12



$$T = RC$$

Fig. 15

```
FILE: SORT      FORTRAN  A    CNEA - CMS - REL 6 PLC 06

      SUBROUTINE SORT(Z,M,AMIN,AMAX)                          SOR00010
      DIMENSION M(10)                                         SOR00020
      IF (Z-AMIN)1,1,2                                        SOR00030
1     WRITE(6,100)Z                                           SOR00040
      M(1)=M(1)+1                                             SOR00050
      RETURN                                                  SOR00060
2     IF(Z-AMAX)5,4,3                                         SOR00070
3     WRITE(6,100)Z                                           SOR00080
      M(10)=M(10)+1                                           SOR00090
      RETURN                                                  SOR00100
4     M(10)=M(10)+1                                           SOR00110
      RETURN                                                  SOR00120
5     K=10.*(Z-AMIN)/(AMAX-AMIN)+1.                           SOR00130
      M(K)=M(K)+1                                             SOR00140
      RETURN                                                  SOR00150
100   FORMAT('1  DATO ',F15.4,                                SOR00160
     1' FUERA DE LOS LIMITES ESPECIFICADOS')                  SOR00170
      END                                                     SOR00180
```

FIG. 10

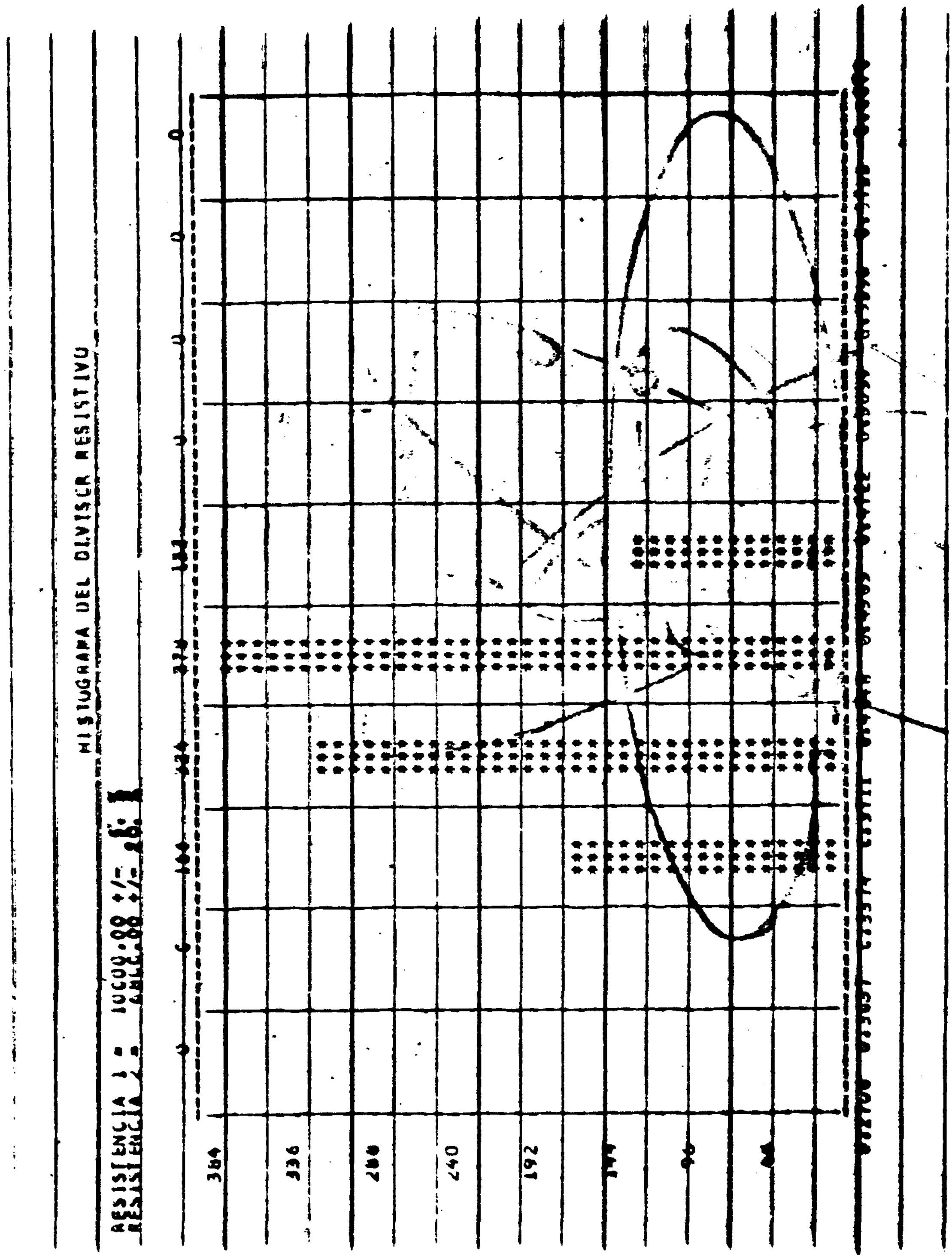
FILE: HIST   FORTRAN A   CUCA - CMS - ILL & PLC CO

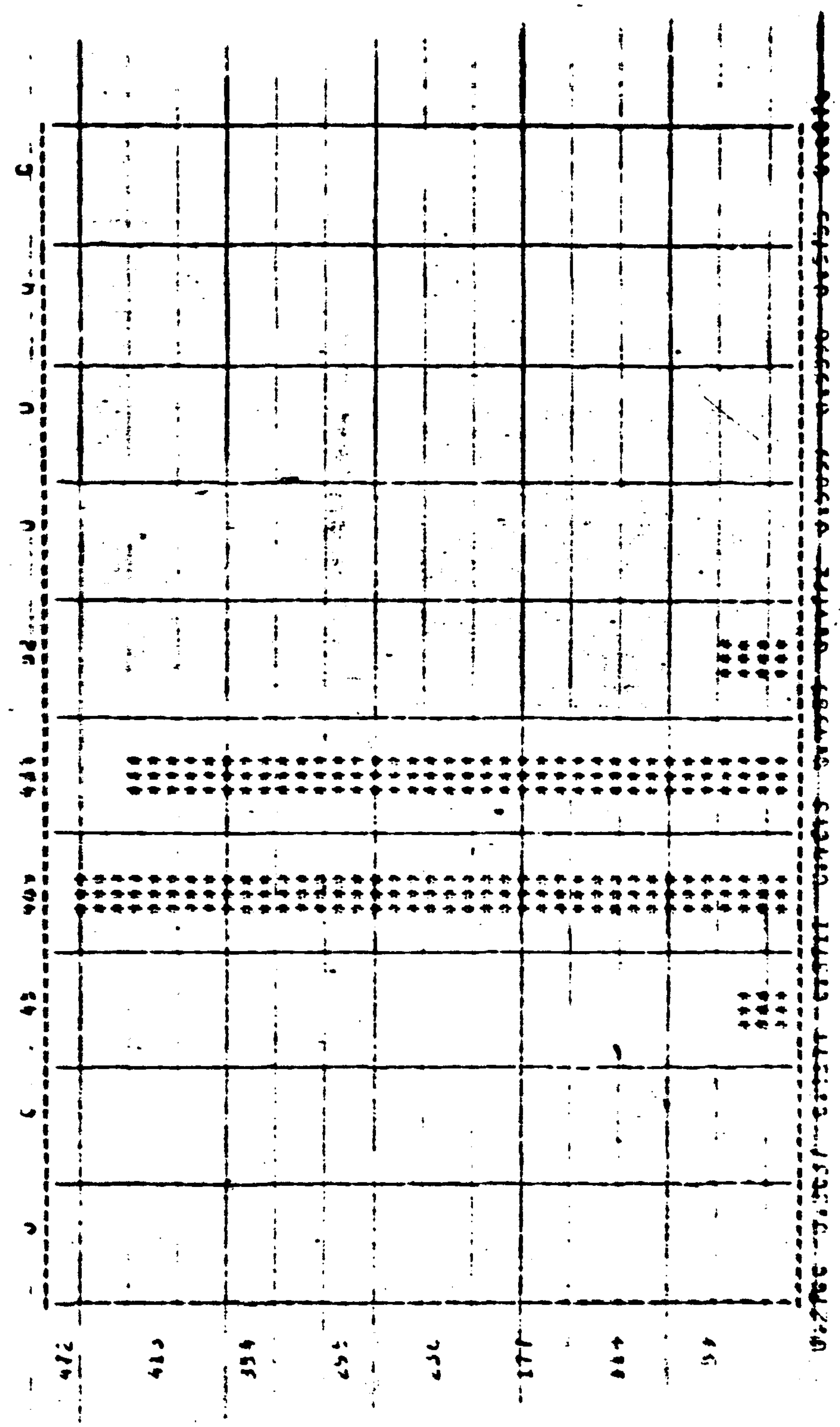
```
      SUBROUTINE HIST (M,MAX,AMIN,AMAX)
      DIMENSION M(10),COL(10),X(11)
      DATA BL/'    '/,ST/'****'/
      MXX=MAX
      IF(MXX.GT.0) GO TO 2
      DO 1 I=1,10
 1    IF (M(I).GT.MXX) MXX=M(I)
 2    N = (MXX - 1) / 8 + 1
      MAX = N*8
      WRITE (6,104) (M(I),I=1,10)
      WRITE (6,100)
      DO 15 I=1,40
      K = MXX - (I-1)*N/5
      DO 9 J=1,10
      IF (K-M(J)) 7,7,8
 7    COL (J) = ST
      GO TO 9
 8    COL (J) = BL
 9    CONTINUE
      IF (((I+4)/5)*5-I-4) 10,11,11
 10   WRITE (6,101) (COL(L),L=1,10)
      GO TO 15
 11   WRITE (6,102) K, (COL(L),L=1,10)
 15   CONTINUE
      WRITE (6,100)
      DELT = (AMAX - AMIN) / 10.
      DO 20 I=1,11
 20   X(I) = AMIN + (I-1) * DELT
      WRITE (6,103) (X(I),I=1,11)
      RETURN
 100  FORMAT (10X,81('-'))
 101  FORMAT (19X,'|',10(2X,A3,2X,'|'))
 102  FORMAT (14X,I4,2X,'|',10(2X,A3,2X,'|'))
 103  FORMAT (14X,11(2X,F6.4)//)
 104  FORMAT (21X,10(I4,4X))
      END
```

FIG. 11

```
FILE: FTCA     FORTRAN   A   CNFA - C4S - REL 6 PLC 36

      INTEGER M(10)/10*0/                                                ROC00010
      IR1 = 347955                                                       ROC00020
      IR2 = 917654                                                       ROC00030
      WRITE (7,222)                                                      ROC00040
222   FORMAT ('ENTRAR RESISTENCIAS Y SUS TOLERANCIAS')                   ROC00050
      WRITE (7,223)                                                      ROC00060
223   FORMAT ('RESISTENCIA 1')                                           ROC00070
      READ (5,333) R1N                                                   ROC00080
333   FORMAT (F10.0)                                                     ROC00090
      WRITE (7,224)                                                      ROC00100
224   FORMAT ('RESISTENCIA 2')                                           ROC00110
      READ (5,333) R2N                                                   ROC00120
      WRITE (7,225)                                                      ROC00130
225   FORMAT ('TOLERANCIA RESISTENCIA 1')                                ROC00140
      READ (5,333) T1N                                                   ROC00150
      WRITE (7,226)                                                      ROC00160
226   FORMAT ('TOLERANCIA RESISTENCIA 2')                                ROC00170
      READ (5,333) T2N                                                   ROC00180
      RAMAX = (R2N + T2N*R2N)/(R1N + R2N - T2N*R2N - T1N*R1N)            ROC00190
      RAMIN = (R2N - T2N*R2N)/(R1N + R2N + T2N*R2N + T1N*R1N)            ROC00200
      DO 10 I = 1, 1000                                                  ROC00210
      CALL RAND (IR1, IY, YFL)                                           ROC00220
      IR1 = IY                                                           ROC00230
      R1 = R1N * ((1 - T1N) + 2 * T1N * YFL)                             ROC00240
      CALL RAND (IR2, IY, YFL)                                           ROC00250
      IR2 = IY                                                           ROC00260
      R2 = R2N * ((1 - T2N) + 2 * T2N * YFL)                             ROC00270
      RATIO = R2 / (R1 + R2)                                             ROC00280
10    CALL SORT (RATIO, M, RAMIN, RAMAX)                                 ROC00290
      WRITE (6,100) R1N,T1N,R2N,T2N                                      ROC00300
      CALL HIST (M, 0, RAMIN, RAMAX)                                     ROC00310
      STOP                                                               ROC00320
100   FORMAT (//48X,'HISTOGRAMA DEL DIVISOR RESISTIVO'//                 ROC00330
     1 10X, 'RESISTENCIA 1 = ',F9.2, ' +/- ',F4.2,' O/O'/                ROC00340
     2 10X, 'RESISTENCIA 2 = ',F9.2, ' +/- ',F4.2,' O/O'//)              ROC00350
      END                                                                ROC00360
```


HISTOGRAMA DEL DIVISOR RESISTIVO
RESISTENCIA 1 =
RESISTENCIA 2 =
384
336
288
240
192
144
96
48



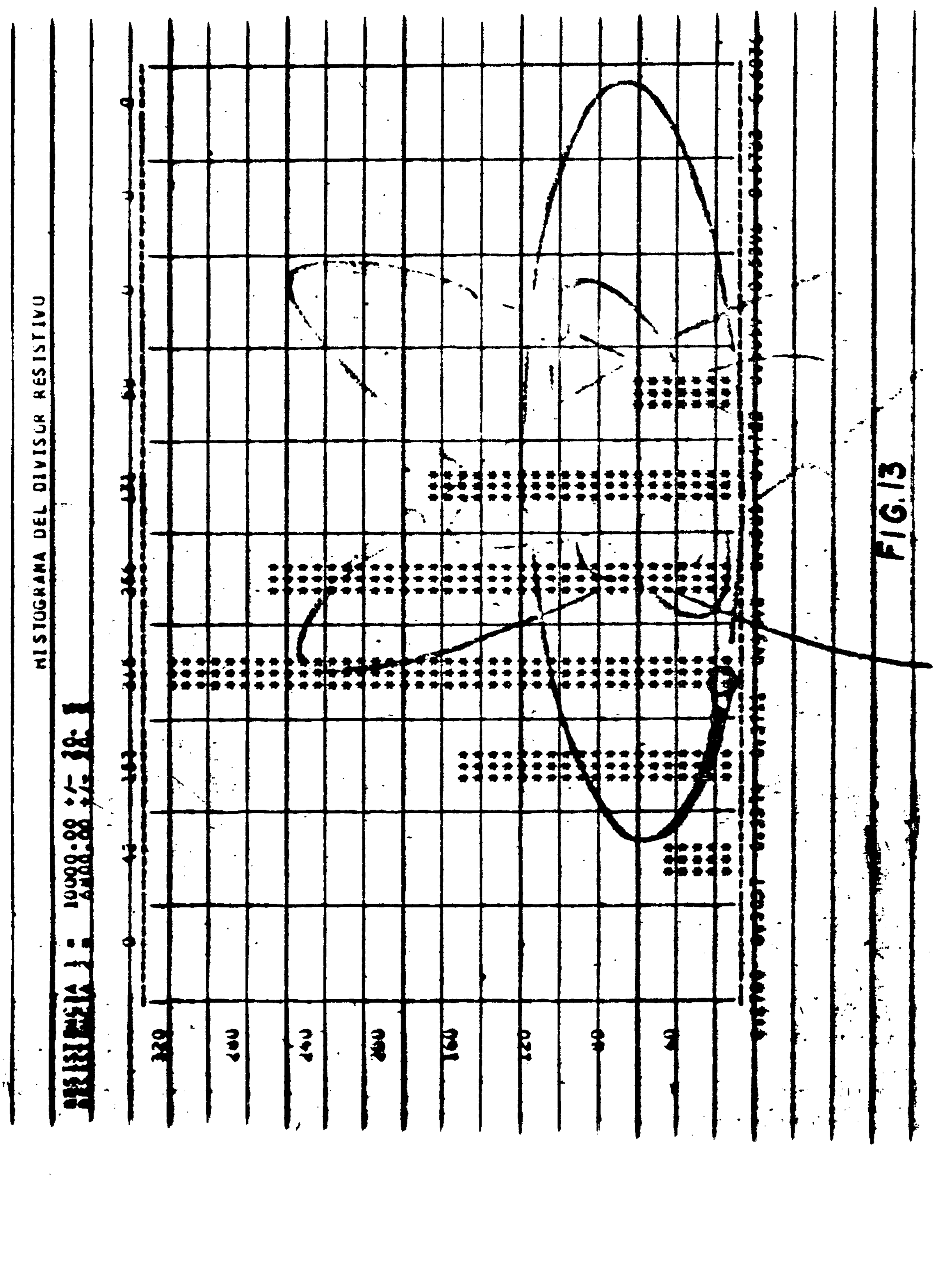


FIG.13

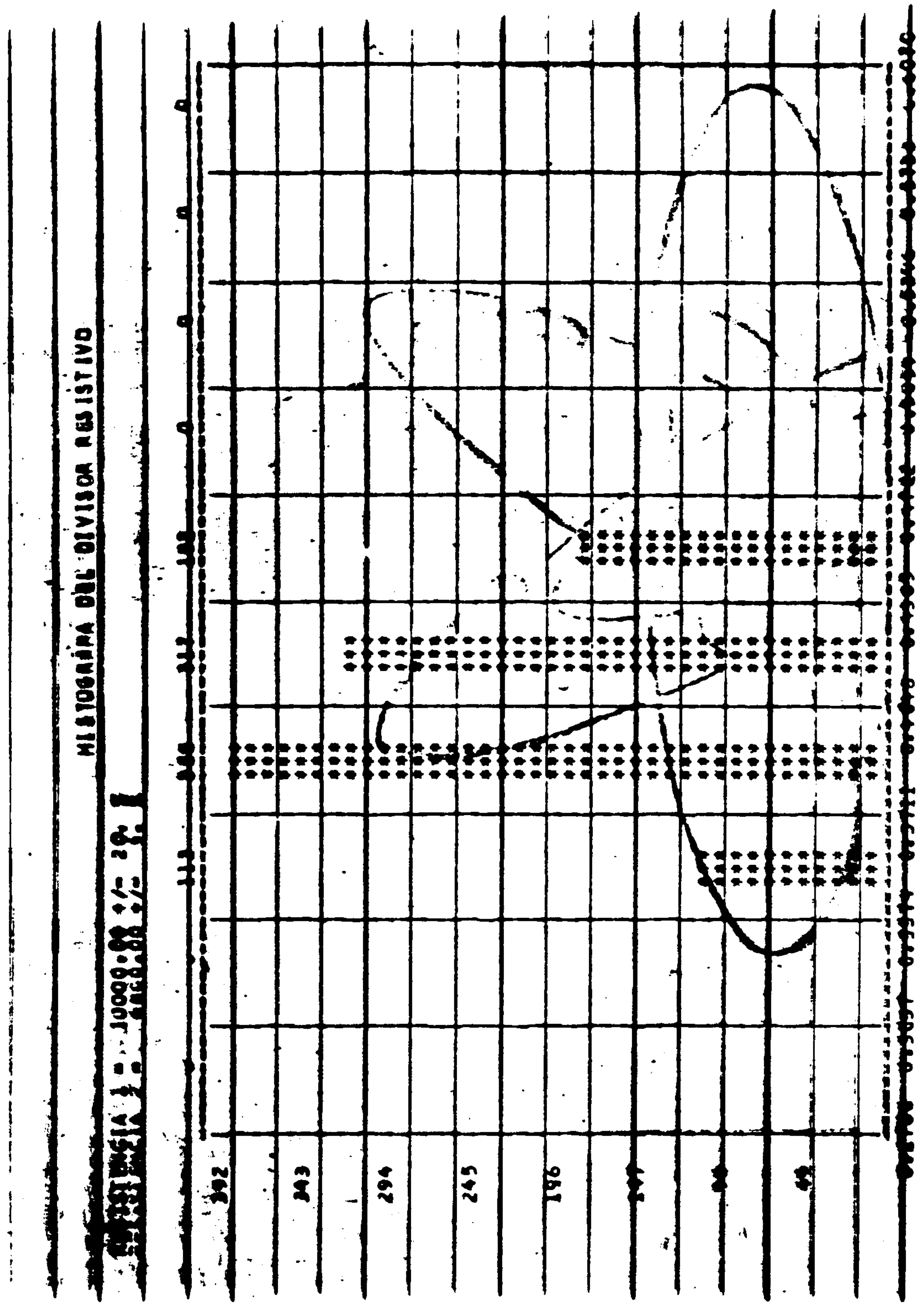


FIG. 14

RELACION ENTRE TOLERANCIAS Y DESVIACION STANDARD

CLASE	TIPO DE COMPONENTE	RELACION	
1	MILITAR DE ALTA CALIDAD	$\mu = N$	$3v = TN$
2	INTERMEDIO O INDUSTRIAL		$2v = TN$
3	COMERCIAL		$v = TN$

N: Valor nominal – μ: valor medio – v: Desviation Standard . T: Tolerancia (%)/100

```
FILE: RCCA2    FORTRAN  A    CNEA - CMS - REL & PLC 06

      INTEGER M(10)/10*0/                                         ROC00010
      IRI = 452469                                                ROC00020
      IC = 652987                                                 ROC00030
      RN = 5.E+05                                                 ROC00040
      CN = 1.E-08                                                 ROC00050
      S = 1.E-03 / 1.0                                            ROC00060
      DO 10 I=1,500                                               ROC00070
      CALL RANDU(IRI,IY,YFL)                                      ROC00080
      IRI = IY                                                    ROC00090
      R = RN * (.9 + .2*YFL)                                      ROC00100
      TOLR = 10.                                                  ROC00110
      TOLC = 10.                                                  ROC00120
    9 CALL GAUSS (IC,S,CN,C)                                      ROC00130
      T = R * C                                                   ROC00140
   10 CALL SORT (T,M,4.05E-03,6.05E-03)                           ROC00150
      WRITE (6,100)RN,TOLR,CN,TOLC                                ROC00160
      CALL HIST (M,0,4.05E-03,6.05E-03)                           ROC00170
      STOP                                                        ROC00180
  100 FORMAT (1H1,//48X,'HISTOGRAMA DE CTE. DE TIEMPO'//          ROC00190
     1 10X, 'RESISTENCIA = ',F8.2,' +/- ',F3.0,' % '//            ROC00200
     2 10X, 'CAPACITOR = ',F8.2,' +/- ',F3.0,' % '//)             ROC00210
      END                                                         ROC00220
```

FIG. 16

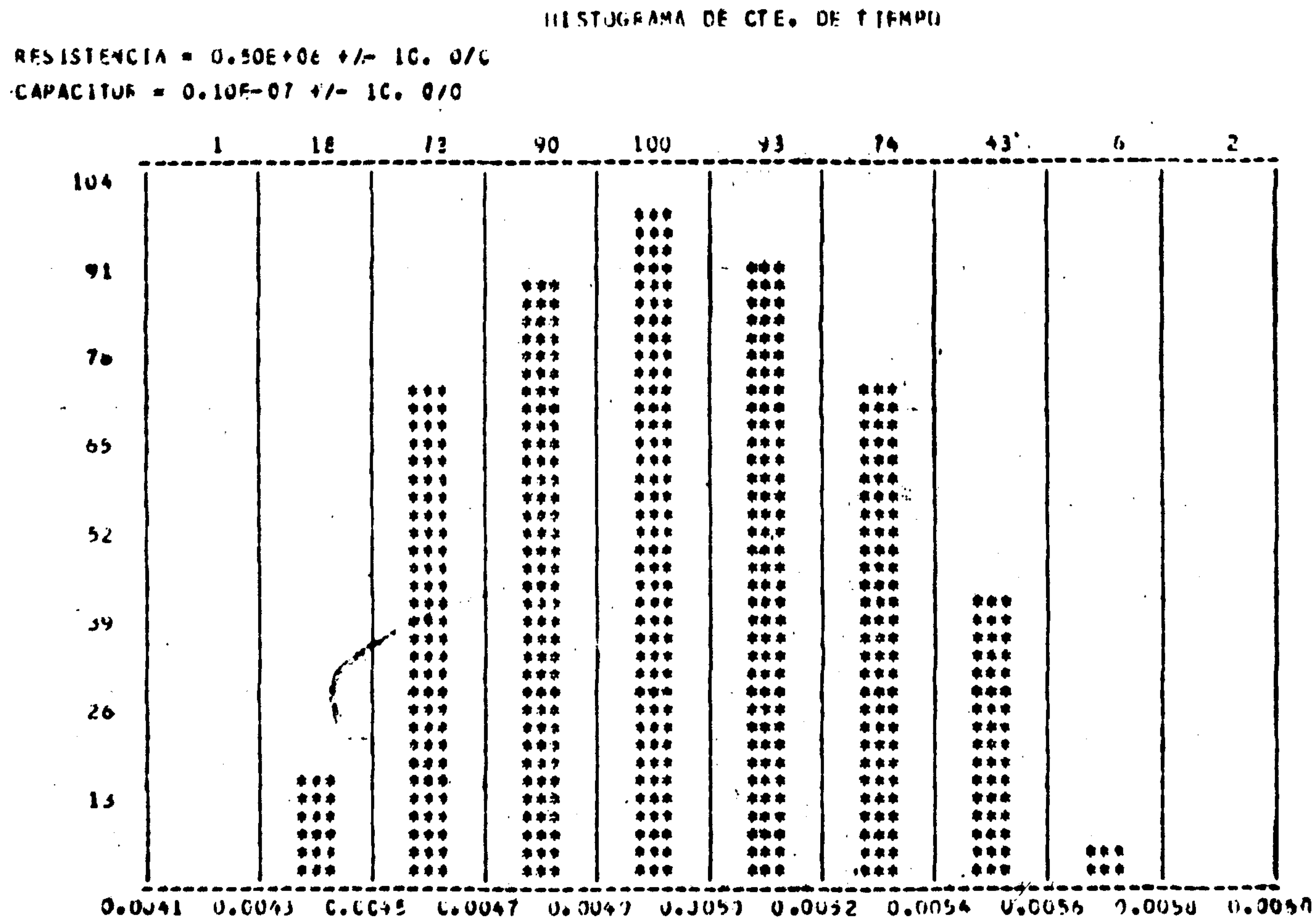

HISTOGRAMA DE CTE. DE TIEMPO
RESISTENCIA = 0.50E+06 +/- 10. 0/0
CAPACITOR = 0.10E-07 +/- 10. 0/0
1 18 72 90 100 93 74 43 6 2
104
91
78
65
52
39
26
13
0.0041 0.0043 0.0045 0.0047 0.0049 0.0051 0.0052 0.0054 0.0056 0.0058 0.0060

FIG. 17

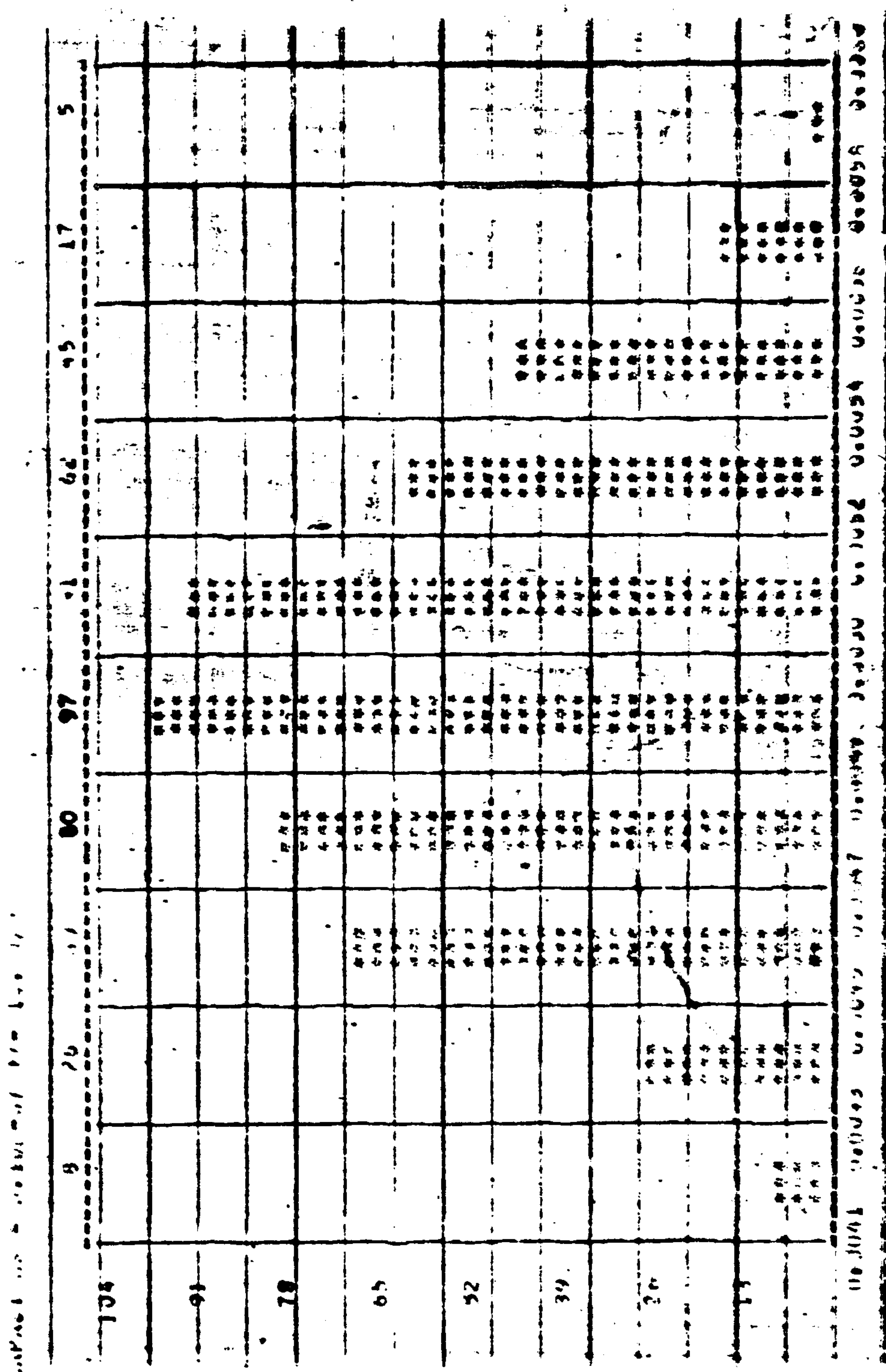


FIG. 18

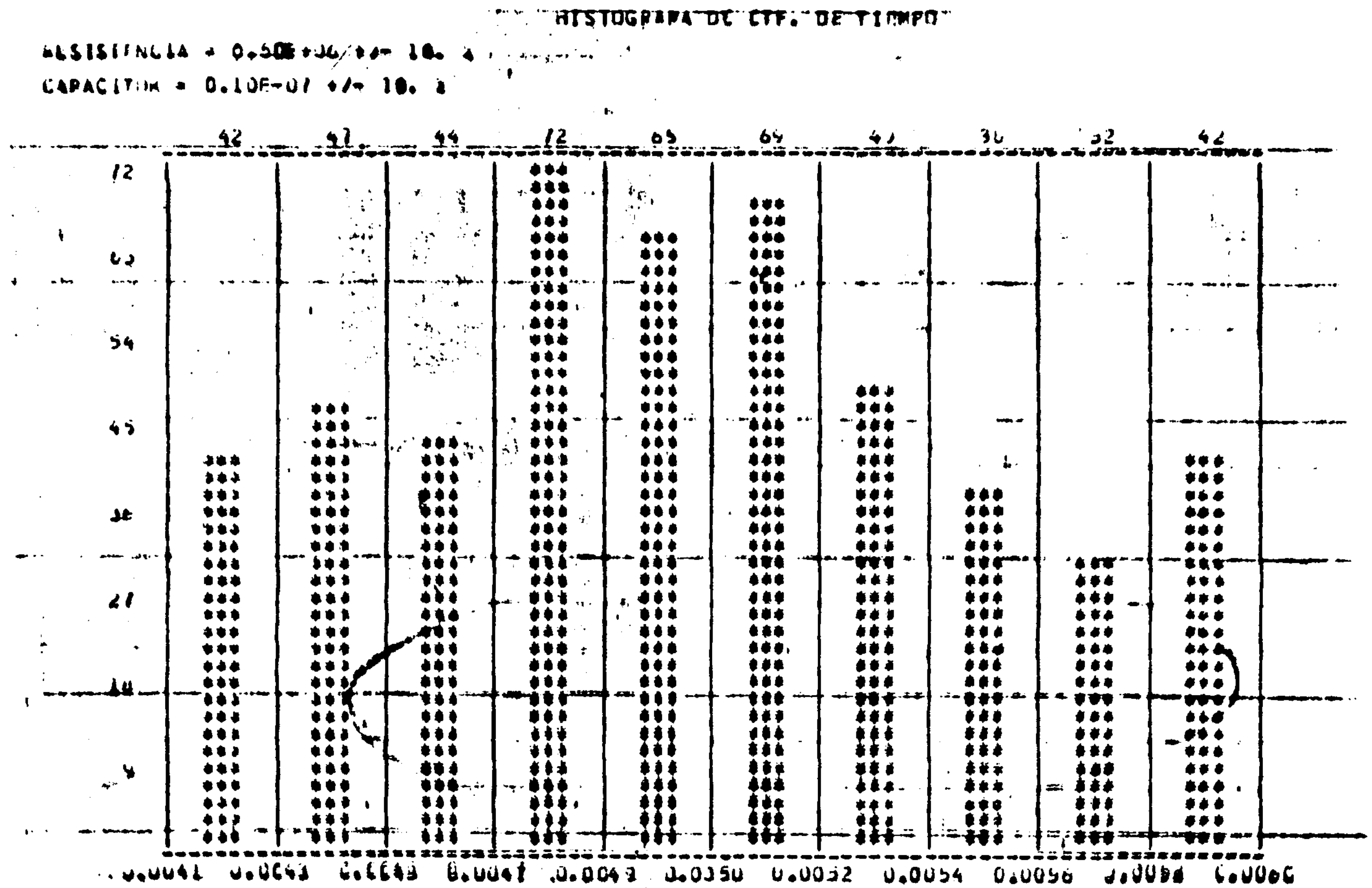

HISTOGRAMA DE CTE. DE TIEMPO
RESISTENCIA = 0.50E+06 +/- 10. %
CAPACITOR = 0.10E-07 +/- 10. %
42
47
44
72
65
69
47
36
32
42
72
63
54
45
36
27
18
9
0.0041
0.0043
0.0045
0.0047
0.0049
0.0050
0.0052
0.0054
0.0056
0.0058
0.0060

FIG. 19

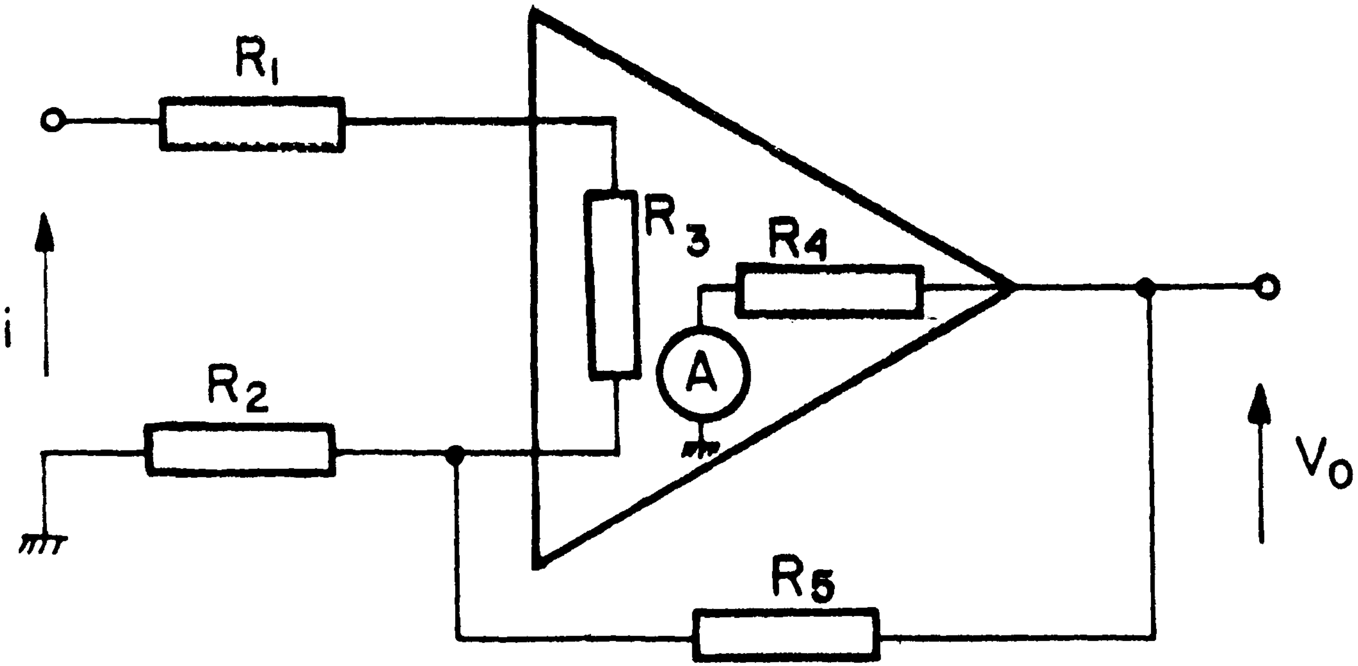


Fig. 20

$$A_s = \frac{R_5 (R_4 + R_1) - A (R_4 . R_3)}{(R_3 + R_5)(R_4 + R_1) + R_2 (R_3 + R_5 + R_4 + R_1) + A R_4 R_2}$$

FILE: ROCAS   FORTRAN A   CREA - CAS - REL 6 PLC 06

```
      INTEGER M(10)/10*0/
      IR1 = 62321
      IR2 = 39645
      IR3 = 14523
      IR4 = 36231
      IR5 = 74657
      IA = 12345
      R4A = .3E+06
      R4B = 1.E+06
      R5A = 75.
      R5S = 10.
      AA = 5.E+04
      AB = 2.E+05
      R1A = 0.
      R1B = 296.43682
      R1C = 2.
      R2A = 0.
      R2B = 296.43682
      R2C = 2.
      R3A = 0.
      R3B = 103092.78
      R3C = 3.
      DO 10 I=1,1000
      CALL UNIFOR (IR4,R4A,R4B,Y4)
      CALL UNIFOR (IA,AA,AB,YA)
      CALL GAUS (IR5,R5S,R5A,Y5)
      CALL WEIBUL (IR1,R1A,R1B,R1C,Y1)
      CALL WEIBUL (IR2,R2A,R2B,R2C,Y2)
      CALL WEIBUL (IR3,R3A,R3B,R3C,Y3)
      AS =ABS((Y5*(Y4+Y1)-YA*Y4*Y3)/((Y3+Y5)*(Y4+Y1)+Y2*(Y3+Y4+Y1+Y5)+
     1 YA*Y4*Y2))
   10 CALL SORT (AS,M,10.,550.)
      WRITE (6,100)
      CALL HIST (M,0,10.,550.)
      STOP
  100 FORMAT (///48X,'HISTOGRAMA DE AMPLIFICACION'//)
      END
```

FIG 21