

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

Protección contra Sobrevoltajes en Motores

TESIS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO
DE
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIZACION POTENCIA
PRESENTADA POR

MARIO RAFAEL AYALA SALCEDO

GUAYAQUIL ECUADOR
1965

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

AL ING. ADOLFO SALCEDO
Director de Tesis, por
su colaboración y ayu-
da para la realización
de este trabajo.

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO

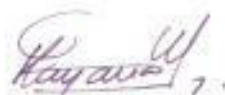


ING. GUSTAVO BERMUDEZ F.
SUB-DECANO DE LA F.I.E.

ING. ADOLFO SALCEDO
DIRECTOR DE TESIS



ING. JORGE FLORES M.
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. JOSE LAYANA CH.
MIEMBRO PRINCIPAL



ING. ALBERTO HANZE B.
MIEMBRO SUPLENTE

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).

.....M. R. Ayala.....

MARIO RAFAEL AYALA SALCEDO

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es determinar la ubicación del más apropiado equipo de protección contra sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas, en un sistema de potencia industrial.

Para tal objetivo se ha desarrollado un programa de computación grabado en diskette en una computadora personal IBM-PC. Este programa, denominado ARREST, da como resultados los sobrevoltajes generados, por la descarga atmosférica, en cada una de las secciones del circuito y para diferentes posiciones del equipo protector (pararrayos y capacitores de protección se pueden simular). Estas posiciones son seleccionadas directamente por el usuario.

Los datos obtenidos permiten conocer los máximos valores de sobrevoltaje en cada sección y en los terminales del motor a proteger, lo que facilita la determinación del equipo de protección adecuado, su ubicación y el nivel básico de aislamiento de los elementos que forman el sistema.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	II
INDICE GENERAL	III
INDICE DE FIGURAS	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
INTRODUCCION	1
I. ONDAS VIAJERAS	4
1.1 Introducción y conceptos básicos	5
1.1.1 Inductancia	8
1.1.2 Capacitancia	9
1.1.3 Resistencia	12
1.1.4 Impedancia Característica	13
1.2 Reflexiones y refracciones	15
1.2.1 Coeficientes de reflexión y refracción ..	16
1.2.2 Comportamiento de las ondas en terminales de líneas	18
1.3 Atenuación y distorsión de ondas viajeras	24
1.3.1 Introducción	24
1.3.2 Efecto de resistencias en serie	25
II. DIAGRAMAS DE LATTICE	34
2.1 Diagramas de voltaje y corriente	34
2.2 Elaboración de programa de computadora	38
2.2.1 Metodología	38

2.2.2 Variables	39
2.2.3 Diagrama de flujo	43
III EQUIPOS DE PROTECCIÓN	47
3.1 Introducción	47
3.2 Equipos de protección	51
3.2.1 Pararrayos	51
3.2.2 Capacitores de protección	61
3.3 Selección del pararrayos y capacitor en la protección de un sistema industrial	62
IV DISEÑO DE LA LINEA	72
4.1 Comportamiento de líneas típicas	72
4.1.1 Introducción	72
4.1.2 Líneas en postes de madera	74
4.1.3 Otros factores	75
4.2 Comportamiento de los equipos bajo sobrevoltajes	81
4.2.1 Transformadores	81
4.2.2 Motores	93
4.3 Diseño óptimo de protección en un sistema de potencia industrial	96
V APLICACION A EJEMPLOS PRACTICOS	100
5.1 Parámetros típicos en un sistema de potencia industrial	100
5.2 Aplicación del programa	107

5.3 Análisis de resultados	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	154
APENDICES	156
BIBLIOGRAFIA	169

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Parámetros de una Onda	5
Onda Rectangular	5
Diferencia de dos Exponenciales	6
Tipos de Onda	7
Influencia de tierra entre dos conductores	11
Representación infinitesimal de una línea	14
Variación de la Impedancia Característica	16
Representación del Corto Circuito	18
Gráficas de Corto Circuito	20
Gráficas de Circuito Abierto	21
Empalmes de líneas diferentes	22
Gráfica de Empalmes de líneas diferentes	22
Empalme de varias líneas	23
Efecto de atenuación y distorsión	24
Terminal Monofásico	34
Diagrama de Lattice del terminal monofásico	35
Diagrama de Lattice de un Corto Circuito	36
Circuito con 3 Impedancias diferentes	37
Diagrama de Lattice del circuito anterior	37
Circuito del Programa Elaborado	38
Gráfica de Operación de un Pararrayos tipo Intermedio	53

Operación del Pararrayos	54
Característica de un Pararrayos tipo válvula	57
Gráfico del Voltaje de Falla en función de la resistencia de falla	67
Variación de descargas en función de la Resistencia a tierra	73
Variación de la Resistencia de Impulso de acuerdo al suelo	78
Variación del Voltaje de Descarga según la separación entre aisladores	80
Representación del devanado de un transformador	84
Distribución inicial de voltaje en un devanado uniforme (Neutro aterrizado y no aterrizado)	85
Distribución del sobrevoltaje transiente en el devanado de un transformador (Vueltas iniciales protegidas y no protegidas)	86
Representación capacitiva de los devanados de un transformador	88
Representación del circuito del transformador	88
Representación del Voltaje transmitido al secundario de un transformador	89
Circuito del Programa Elaborado	100
Características del Pararrayos del ejemplo de aplicación	108
Diagramas de Lattice del ejemplo de aplicación	115-122
Gráficos del Computador	138-152

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Característica de Conductores Desnudos de Cobre (97,3% de conductividad)	28
Característica de Conductores Desnudos de Aluminio (AC SR)	29
Característica de Conductores Aislados sencillos de cables concéntricos (Aluminio 1 KV)	30
Característica de Conductores Aislados sencillos de cables concéntricos (Cobre 1 KV)	31
Característica de Conductores Aislados sencillos de cables concéntricos (Aluminio 15 KV)	32
Característica de Conductores Aislados sencillos de cables concéntricos (Cobre 15 KV)	33
Clasificación de Sistemas por el método de conexión a tierra según las normas A.S.A.	66
Tabla de selección de Pararrayos	71
Comportamiento de líneas en postes de madera	74
Comportamiento de líneas en torres metálicas	75
Características de Funcionamiento de los Transformadores de Distribución Monofásicos en baño de aceite a 60 Hz. (Tensión normal de 13.200 V en Alta Tensión)	101
Características de Funcionamiento de los Transformadores de Distribución Monofásicos en baño de aceite a 60 Hz. (Tensión normal de 66.000 V en Alta Tensión)	101
Características de Funcionamiento de los Transformadores de Distribución Trifásicos en baño de aceite a 60 Hz. (Tensión normal de 13.200 V en Alta Tensión)	102
Características de Funcionamiento de los Transformadores de Distribución Trifásicos en baño de aceite a 60 Hz. (Tensión normal de 66.000 V en Alta Tensión)	102

Impedancia Característica de transformadores (por fase)	103
Impedancia Característica de Conductores sencillos aislados	103
Impedancia Característica de Conductores aéreos desnudos	104
Impedancia Característica típica de máquinas sincrónicas	105
Valores típicos de máquinas sincrónicas trifásicas	106
Características de los equipos del ejemplo	107
Resultados obtenidos luego de la ejecución del programa	153

INTRODUCCION

Considero que los problemas originados por las descargas atmosféricas merecen gran atención en la actualidad, en especial desde el punto de vista de protección de equipos costosos e imprescindibles para la continuidad del servicio eléctrico. Este trabajo teórico práctico pretende ayudar en la resolución de este problema.

En él se encuentran interesantes capítulos sobre temas, problemas, y condiciones que he considerado apropiados para la elaboración de este trabajo.

Sé muy bien que hay excelentes trabajos en el campo eléctrico, particularmente en lo referente a fenómenos transientes, sólo pretendo colaborar con lo ya escrito.

Muchos son los problemas que originan los sobrevoltajes transientes producidos por las descargas atmosféricas, los cuales en ciertas ocasiones pretenden ser solucionados considerando sólo el factor económico o el factor experiencia. En vista de ello se ha desarrollado este trabajo, cubriendo en el Capítulo Primero algunos aspectos teóricos sobre ondas en líneas de transmisión, ya que el sobrevoltaje producido por

un disturbio de origen externo al sistema generalmente se manifiesta con una magnitud que puede ser varias veces el voltaje nominal del sistema y con una forma de onda de alta frecuencia y no periódica, conocida como onda de impulso.

El Capítulo Segundo trata sobre el fenómeno transiente en lineas de diferentes impedancias, exponiendo claramente el método de Bewley de resolución. Al final de este capítulo se desarrolla el programa de computación que calcula los sobrevoltajes producidos en el sistema y que permite determinar la adecuada protección.

El Capítulo Tercero desarrolla conceptos teóricos sobre equipos de protección.

El Capítulo Cuarto desarrolla ideas y criterios prácticos sobre protección contra sobrevoltajes en un sistema.

El Capítulo Quinto analiza los resultados de la aplicación a un ejemplo del programa elaborado.

Finalmente, me considero sumamente afortunado de haber contado con la colaboración de los profesores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, y en especial del señor ingeniero Adol

fo Salcedo, Director de esta Tesis, quien hizo posible este producto final,

1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.
11.
12.
13.
14.
15.
16.
17.
18.
19.
20.
21.
22.
23.
24.
25.
26.
27.
28.
29.
30.
31.
32.
33.
34.
35.
36.
37.
38.
39.
40.
41.
42.
43.
44.
45.
46.
47.
48.
49.
50.
51.
52.
53.
54.
55.
56.
57.
58.
59.
60.
61.
62.
63.
64.
65.
66.
67.
68.
69.
70.
71.
72.
73.
74.
75.
76.
77.
78.
79.
80.
81.
82.
83.
84.
85.
86.
87.
88.
89.
90.
91.
92.
93.
94.
95.
96.
97.
98.
99.
100.

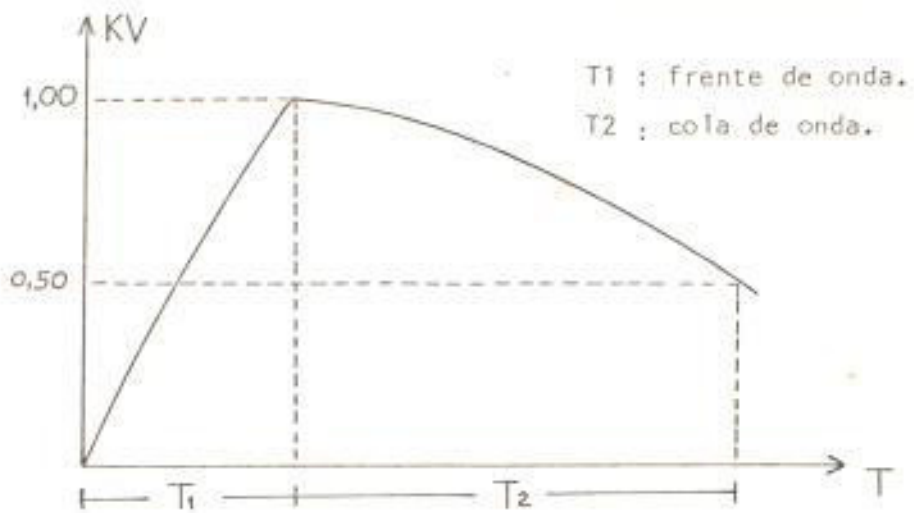
I. ONDAS VIAJERAS.

1.1 INTRODUCCION Y CONCEPTOS BASICOS.

El continuo esfuerzo del sector eléctrico por preservar la integridad de los equipos y aumentar la continuidad de servicio ha originado que se dirija especial atención hacia la protección de sobrevoltajes en líneas de transmisión y equipos.

Una onda viajera se caracteriza generalmente por cuatro factores (figura 1.1): la cresta de onda, que es su máxima amplitud y suele darse en Voltios o Kilovoltios; el frente de onda, que es el tiempo desde su inicio hasta la cresta y se mide en microsegundos; la cola de onda, que es el tiempo entre la cresta y el punto donde la onda ha descendido hasta la mitad de su valor máximo; y la polaridad.

Por simplicidad para los cálculos de sobrevoltajes se suele usar la onda rectangular infinita (figura 1.2). Esta onda salta bruscamente desde cero hasta su valor total y así se



Parâmetros de uma Onda

Figura 1.1

mantiene en adelante. Esta onda es la más peligrosa para aparatos debido a que su abrupto frente causará máximos gradientes y su sostenida cola producirá máxima oscilación en los devanados de una máquina.



Onda Rectangular

Figura 1.2

La onda infinita es muy útil ya que siempre es posible representar una onda cualquiera como un conjunto de ondas rectangulares.

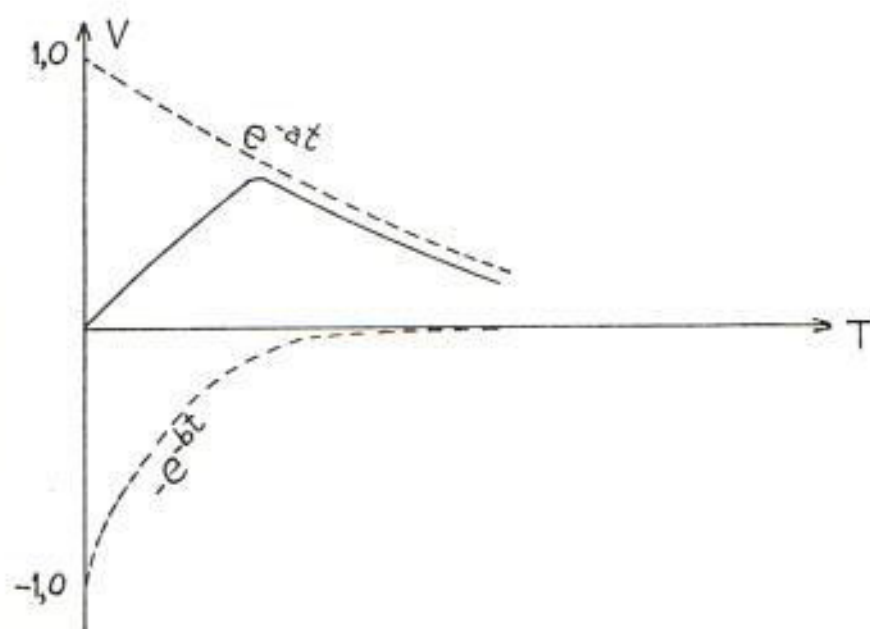
Una expresión de gran versatilidad y que se asemeja bastante a una onda práctica es la diferencia de dos exponenciales:

$$V = E (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (1.1)$$

donde:

E, a, b , son constantes arbitrarias.

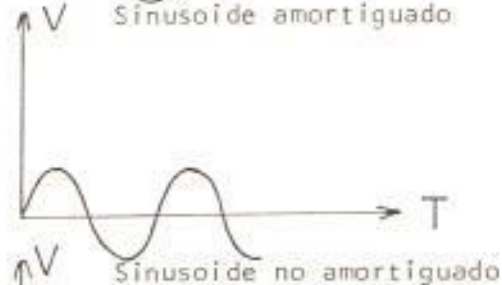
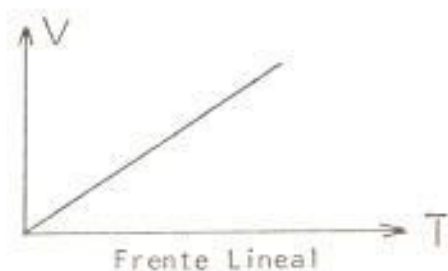
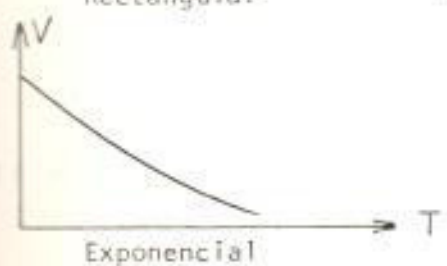
Su representación puede observarse en la figura 1.3.



Diferencia de dos Exponenciales

Figura 1.3

En general hay 8 casos especiales de formas de onda de cierto interés: rectangular infinita, exponencial simple, frente convexo, frente cóncavo, frente lineal, senoide amortiguado, senoide no amortiguado, y la onda de las descargas atmosféricas. (Figura 1.4).



Tipos de Onda
Figura 1.4

1.1.1 Inductancia.

La inductancia es el parámetro más importante de la línea. Para diseños de líneas la reactancia correspondiente ($X = \omega L$) es la impedancia dominante debido a su influencia en la capacidad de transmisión y en las caídas de voltaje.

La autoinductancia de un circuito eléctrico es el número de enlaces de flujo del circuito por unidad de corriente.

Esto es:

$$L = \frac{d\Psi}{di} \quad (1.2)$$

donde

L : autoinductancia del circuito.

Ψ : enlaces de flujo del circuito.

i : corriente del circuito.

Si en el circuito la permeabilidad es constante, se tiene:

$$L = \frac{\Psi}{i} \quad (1.3)$$

La inductancia de un conductor es el número de enlaces de flujo del conductor por unidad de corriente.

En el desarrollo de fórmulas para inductancia de línea (también para la capacitancia) es necesario conocer exactamente el comportamiento del campo magnético (y eléctrico). Considerando que los conductores están formados por cablecillos trenzados, que están arqueados entre postes, y que la línea puede cruzar terrenos cuyas constituciones de campos magné-

tico y eléctrico son muy conocidas, es importante que cualquier modelo que se escoja sea el más aproximado posible. En consecuencia, algunas suposiciones, que son razonables, se suelen hacer y los resultados de pruebas realizadas confirman una cercana exactitud. Estas suposiciones son:

- 1.-Los conductores son rectos, paralelos y de longitud infinita.
- 2.-Los conductores son cilíndricos y las densidades de corriente son uniformes.
- 3.-La presencia de tierra no afectará el campo magnético y en consecuencia no afecta las fórmulas de inductancia.
- 4.-La presencia de tierra afectará en algunas ocasiones la medida del campo eléctrico, afectando las fórmulas de capacitancia.

Al final del Capítulo se presenta una tabla con valores de inductancia para diferentes tipos de conductores.

1.1.2 Capacitancia.

La capacitancia y la conductancia forman la admitancia paralelo de la línea, pero la conductancia suele despreciarse o eliminarse ya que su contribución es pequeña y no hay buena manera de calcularla debido a que es muy variable (las fugas de los aisladores, principal fuente de conductancia, varían apreciablemente con las condiciones atmosféricas y con

las propiedades conductoras de la mugre que se adhiere al aislador).

Los elementos serie, donde la inductancia es el dominante, establecen un límite a la corriente que puede circular por la línea y en consecuencia determinan la capacidad posible de transmisión de la línea.

Los elementos paralelo, donde la capacitancia es el dominante, representan una fuente de potencia reactiva.

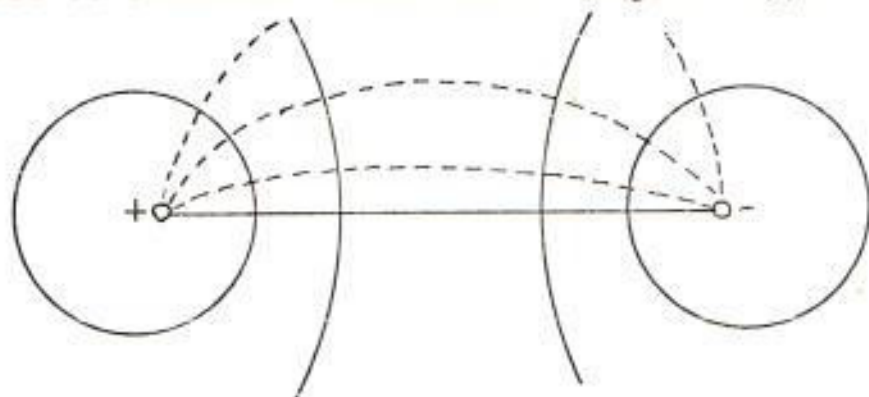
Los Megavars generados son proporcionales al cuadrado del voltaje de línea, y la importancia de los elementos paralelo aumenta con la magnitud del voltaje de operación.

En sistemas de alto voltaje, el efecto capacitivo tiene suma importancia. La diferencia de potencial entre los conductores hace que éstos se carguen como las placas de un condensador cuando existe diferencia de potencial entre ellas. La capacitancia entre conductores es la carga por unidad de diferencia de voltaje. La capacitancia entre conductores paralelos es constante, sólo depende del espaciamiento entre conductores y de su tamaño.

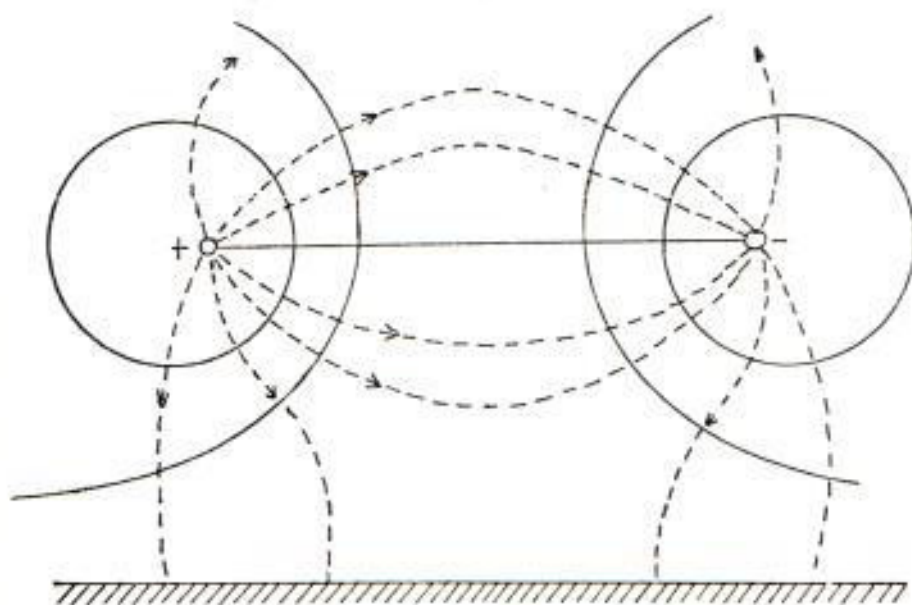
La presencia de tierra afectará considerablemente las líneas de flujo eléctrico y las superficies equipotenciales lo cual variará la capacitancia efectiva entre conductores.

Cuando las distancias entre las fases, y entre fases y tierra son del mismo orden de magnitud, estos efectos no pue-

den ser siempre despreciados. Nótese la influencia de tierra cuando se tienen dos conductores (Figura 1.5).



(sin considerar el efecto de tierra)



(considerando el efecto de tierra)

- : líneas de campo eléctrico.
 ————— : superficies equipotenciales.

Figura 1.5

1.1.3 Resistencia.

La resistencia efectiva de un conductor se define como:

$$R = \frac{Pot}{I^2} \quad (1.4)$$

donde

Pot : pérdida de potencia en el conductor.

I : corriente eficaz del conductor.

La resistencia a la corriente continua se define así:

$$R_0 = \frac{\rho l}{A} \quad (1.5)$$

donde

ρ : resistividad del conductor (ohmio-mt.).

l : longitud del conductor (mt).

A : área de la sección transversal (mt²).

R_0 es igual a R cuando la distribución de corriente es uniforme.

La resistencia a la corriente continua en conductores de hilos trenzados es mayor que el establecido en R_0 , ya que los hilos tienen mayor longitud que el conductor. Por cada kilómetro de conductor la corriente tiene que recorrer en todos los hilos, excepto el central, más de un kilómetro. El incremento de resistencia debido a la espiral que forman en los hilos se estima en 1% para conductores de 3 hilos y en 2% para los de hilos concéntricos.

La resistencia, al igual que la conductancia paralela, tie-

ne poca importancia, su efecto en la capacidad de transmisión de la línea es insignificante; sin embargo determinan completamente las pérdidas reales de transmisión.

La variación de la resistencia de los conductores con temperaturas es casi lineal. La fórmula para calcular la nueva resistencia a temperatura t_2 es:

$$R_2 = \frac{T + t_2}{T + t_1} \times R_1 \quad (1.6)$$

donde

R_2 : resistencia a nueva temperatura t_2 .

R_1 : resistencia a temperatura inicial t_1 .

t_2 : temperatura nueva (grados centígrados.)

t_1 : temperatura inicial (gr. centígrados.)

T : constante que depende del material.

Los valores de T son:

234,5 para cobre recocido de 100% de conductividad.

241 para cobre estirado en frío de 97,3% de conductividad.

228 para aluminio estirado en frío de 61% de conductividad.

1.1.4 Impedancia Característica.

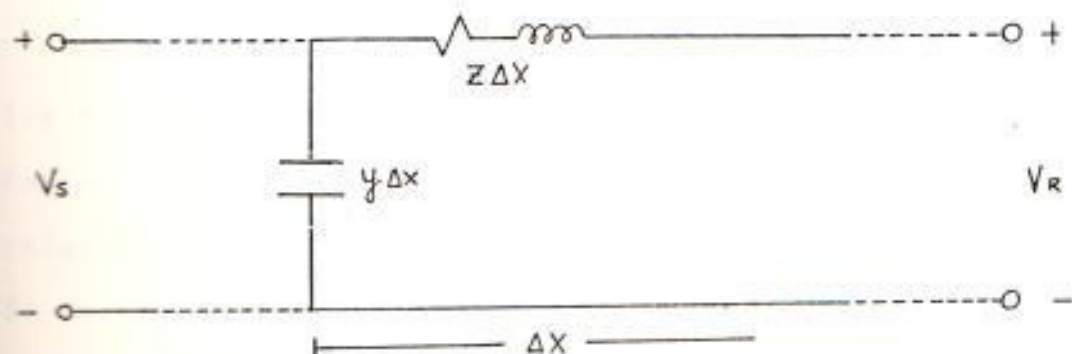
La impedancia característica de una línea se define como:

$$Z = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (1.7)$$

donde:

z : impedancia de la línea.

y : admitancia de la línea.



Representación infinitesimal de una línea

Figura 1.6

V_S : voltaje de envío.

V_R : voltaje de recepción.

x : infinitesimal de distancia.

z : impedancia serie de la línea por unidad de longitud.

y : admitancia paralela de la línea por unidad de longitud.

También

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \quad (1.8)$$

Al final del Capítulo se presenta una tabla con valores de resistencia para diferentes tipos de conductores y equipos.

Si la línea no tiene pérdidas o se desprecian, se tiene que la ecuación (1.8) se transforma en:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.9)$$

1.2 REFLEXIONES Y REFRACCIONES.

Existe una estricta proporcionalidad entre las ondas de corriente y las ondas de voltaje en líneas de transmisión. El factor de proporcionalidad es la impedancia característica Z de la línea.

Cuando una onda viajera llega a un punto de transición donde existe un cambio brusco de las constantes del circuito, una parte de la onda es reflejada en la línea y otra parte puede pasar hacia otras secciones del circuito. En el punto de transición el voltaje (o la corriente) puede ser un valor entre cero y el doble de la magnitud de la onda.

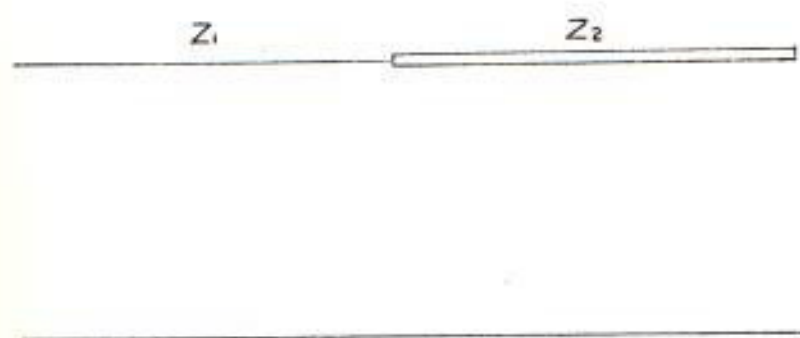
La onda que llega es llamada onda incidente, y las ondas a que da lugar son llamadas ondas reflejada y transmitida. Tales ondas son formadas de acuerdo a las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff.

Las amplitudes de las ondas reflejada y refractada son tales que la relación de voltaje y corriente se mantiene igual.

1.2.1 Coeficientes de Reflexión y Refracción.

Considérese la unión entre dos líneas de distintas impedancias z_1 y z_2 . Supóngase que una onda de voltaje del tipo escalón se aproxima a la unión a través de la línea 1. (Figura 1.7). La onda de corriente tendrá la misma forma con magnitud:

$$I_1 = \frac{V_1}{z_1} \quad (1.10)$$



Variación de la Impedancia Característica

Figura 1.7

Supóngase que las ondas de voltaje reflejada y refractada sean V_2 y V_3 , respectivamente, por lo que

$$I_2 = \frac{-V_2}{z_1} \quad (1.11)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{z_2} \quad (1.12)$$

Nótese que I_2 tiene un signo opuesto al de V_2 porque se des

plaza en sentido contrario, es decir, en la dirección opuesta a las demás corrientes.

Las corrientes y los voltajes deben satisfacer las leyes de Kirchhoff:

$$V_1 + V_2 = V_3 \quad (1.13)$$

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (1.14)$$

y en consecuencia:

$$\frac{V_1}{Z_1} - \frac{V_2}{Z_1} = \frac{V_3}{Z_2} \quad (1.15)$$

$$\frac{V_1}{Z_1} - \frac{V_2}{Z_1} = \frac{V_1}{Z_2} + \frac{V_2}{Z_2} \quad (1.16)$$

$$V_2 \left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_1} \right) = V_1 \left(\frac{1}{Z_1} - \frac{1}{Z_2} \right) \quad (1.17)$$

$$V_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} V_1 \quad (1.18)$$

La cantidad $\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$ es llamada coeficiente de reflexión y se designa por la letra "a". Este valor es positivo o negativo, dependiendo de las magnitudes de Z_1 y Z_2 .

El valor de la onda refractada se obtiene eliminando V_2 :

$$V_3 = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} V_1 \quad (1.19)$$

Esta ecuación define el coeficiente de refracción "b":

$$b = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (1.20)$$

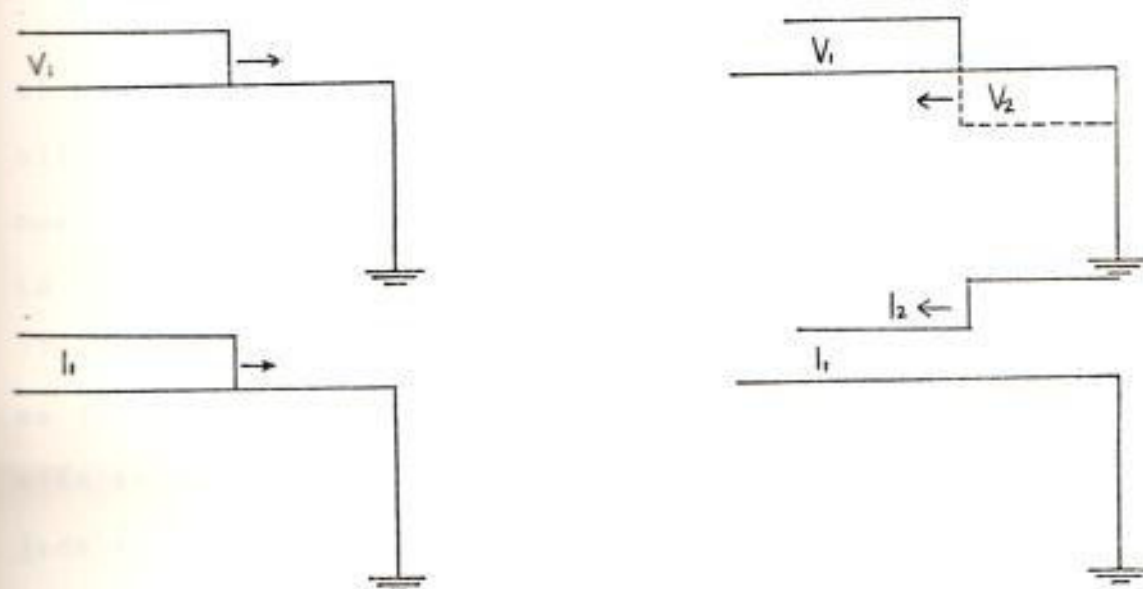
Este coeficiente varía entre cero y dos.

1.2.2 Comportamiento de las ondas en los terminales de líneas.

Se presentarán algunos casos; un cuadro completo se encuentra en el Apéndice A.

a) Corto Circuito.

Su característica es la imposibilidad de desarrollar un voltaje a través de él. (Figura 1.8). En consecuencia, cuando una onda viajera llega a un corto circuito, la onda reflejada debe cancelar la onda incidente de tal forma que la refractada sea cero. La corriente que circula por la línea y que regresa (corriente reflejada) se dobla.



Representación del Corto Circuito

Figura 1.8

Lo antes mencionado se aclara matemáticamente así:

$$z_1 = z_1 \quad (1.21)$$

$$z_2 = 0 \quad (\text{corto circuito}) \quad (1.22)$$

Por consiguiente:

$$V_2 = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} V_1 = -V_1 \quad (1.23)$$

$$V_2 = -V_1 \quad (\text{onda reflejada}) \quad (1.24)$$

En forma similar se obtiene:

$$V_3 = \frac{2 z_2}{z_2 + z_1} = 0 \quad (1.25)$$

$$V_3 = 0 \quad (\text{onda refractada}) \quad (1.26)$$

Con las ecuaciones de corriente se tiene:

$$I_2 = \frac{-V_2}{z_1} = \frac{+V_1}{z_1} = +I_1 \quad (1.27)$$

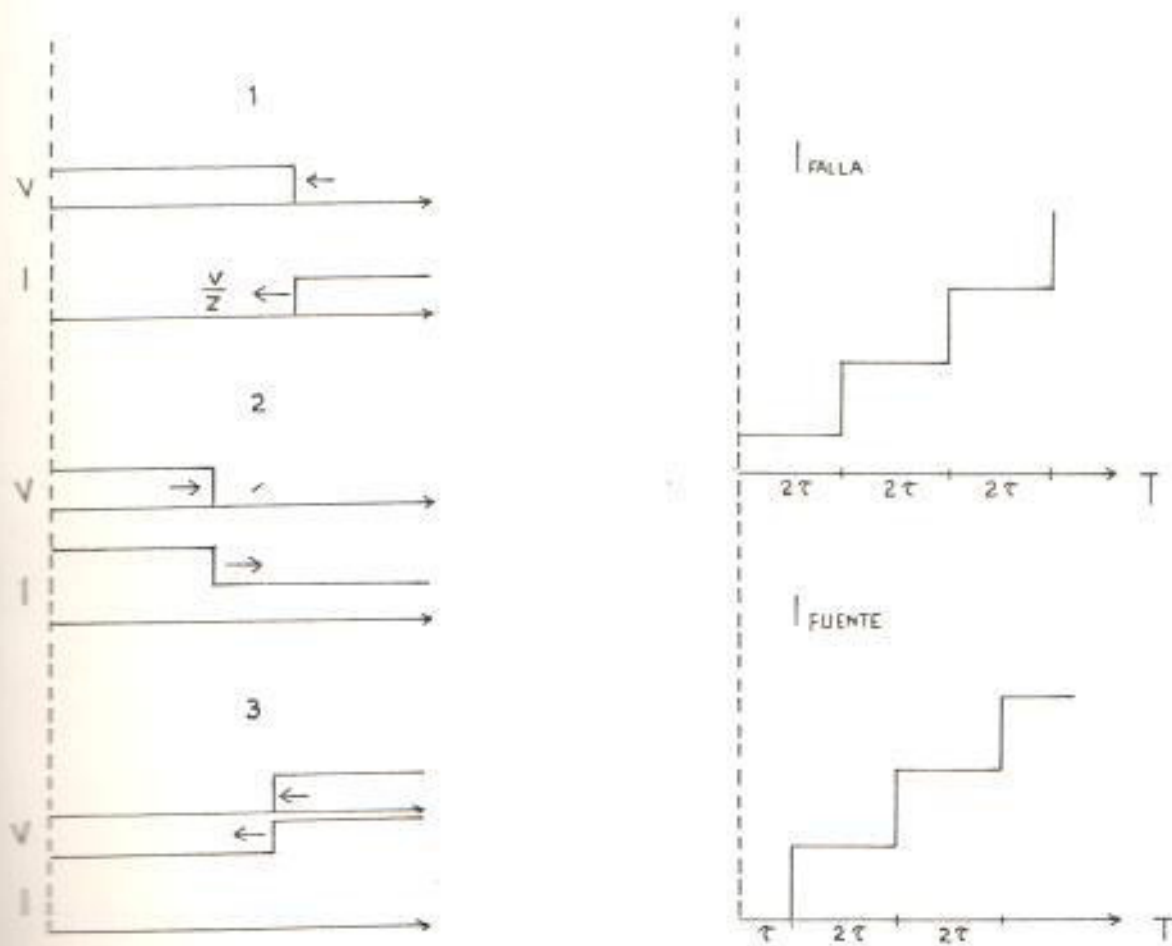
$$I_2 = I_1 \quad (1.28)$$

$$I_3 = 2 \cdot I_1 \quad (1.29)$$

Si un corto circuito es aplicado a una línea de transmisión alimentada por una fuente de voltaje, que entrega constantemente un voltaje V , se tendrá lo siguiente:

La corriente de falla, si se desprecia la resistencia de la línea, aumentará indefinidamente a razón de $V/1L$, donde $1L$ es la inductancia al punto de falla y a 1 metros de separación entre la falla y la fuente. Se sabe que la onda reflejada tiene amplitud $-V$ y por consiguiente la onda reflejada de corriente es $+V/z$ (Figura 1.9). Cuando la onda de voltaje llega a la fuente, se inicia una nueva onda de voltaje $+V$, que está asociada con una de corriente $+V/z$ (Figura 1.9

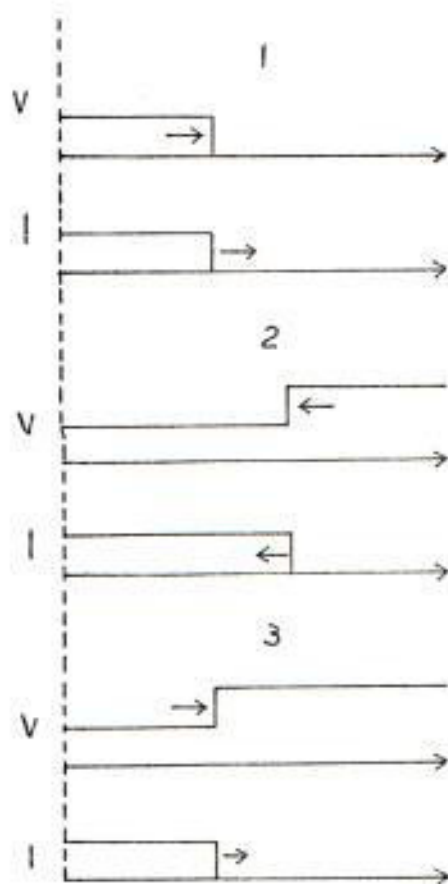
Así, el ciclo se repite de tal forma que la corriente de corto circuito aumenta en pasos discretos. En la fuente el efecto del corto circuito no es sentido hasta un tiempo τ luego de ser aplicado. Este es el tiempo que le toma a la onda inicial viajar desde la falla a la fuente. En lo posterior, la corriente aumenta en pasos de $2V/z$, a intervalo de 2τ .



Gráficas de Corto Circuito
 Figura 1.9

b) Circuito Abierto.

Un circuito abierto implica que la corriente debe ser cero todo el tiempo. Por lo tanto, cuando una onda de corriente I llega a un circuito abierto, se origina una onda de amplitud $-I$, la misma que viajará hacia la fuente con una onda de voltaje $+V$ (Figura 1.10).



Gráficas de Circuito Abierto

Figura 1.10

Para este caso:

$$z_1 = z_1 \quad (1.30)$$

$$z_2 = \infty \quad (1.31)$$

$$V_2 = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} V_1 = V_1 \quad (1.32)$$

$$V_2 = V_1 \quad (\text{onda reflejada}) \quad (1.33)$$

$$V_3 = 2V_1 \quad (\text{onda refractada}) \quad (1.34)$$

$$I_2 = \frac{-V_1}{z_1} = -I_1 \quad (1.35)$$

$$I_3 = 0 \quad (1.36)$$

c) Empalmes de líneas diferentes.

Gráficamente se representa así:



Empalmes de líneas diferentes

Figura 1.11

Este caso es exactamente igual a:

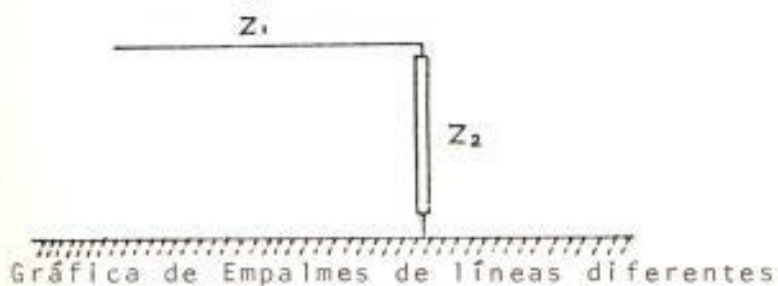


Figura 1.12

En este caso simplemente se deben aplicar las ecuaciones:

$$V_2 = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} V_1 \quad (1.37)$$

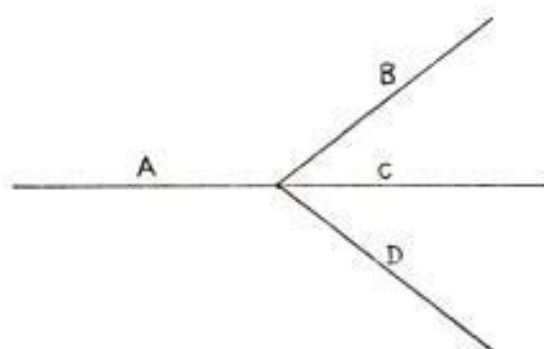
$$V_3 = \frac{2 z_2}{z_2 + z_1} V_1 \quad (1.38)$$

Para las corrientes:

$$I_2 = \frac{-V_2}{z_1} \quad (1.39)$$

$$I_3 = \frac{V_3}{z_2} \quad (1.40)$$

d) Empalme de varias líneas.



Empalme de varias líneas

Figura 1.13

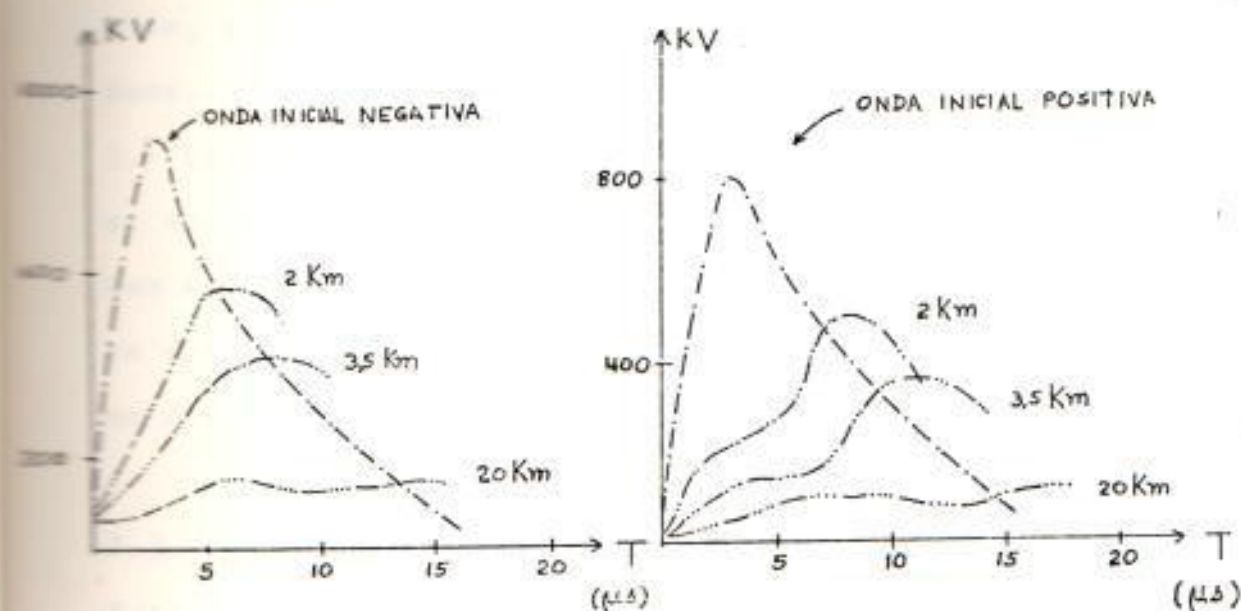
Cuando una onda viaja a lo largo de la línea A y llega a un punto de unión de dos o más líneas diferentes que están separadas una distancia suficiente para que el acoplamiento mutuo sea despreciable, entonces los voltajes reflejado y transmitidos pueden ser calculados reemplazando las líneas a la derecha del punto de unión por una impedancia paralela (similar al literal c), donde su valor es la impedancia ca-

racterística de las líneas a la derecha de la unión.

1.3 ATENUACION Y DISTORSION DE ONDAS VIAJERAS.

1.3.1 Introducción.

Además de los efectos mencionados, las ondas viajeras experimentan atenuación y distorsión mientras se propagan a lo largo de la línea, causado principalmente por pérdidas de energía de la onda. En altos voltajes el efecto corona provoca que las ondas sean atenuadas en pocos kilómetros a un valor seguro de voltaje. El efecto de la atenuación y distorsión puede observarse en la figura 1.14.



Efecto de atenuación y distorsión.

Figura 1.14

Una importante fuente de pérdidas es la resistencia de la línea. Este efecto será sentido principalmente en el frente de la onda viajera donde la corriente tiende a variar rápidamente. Las corrientes circulan a tierra bajo condiciones de falla y, dependiendo de las condiciones del terreno, la tierra puede introducir una resistencia considerable. Pérdidas también se tienen debido a fugas a través de la resistencia del aislamiento de la línea.

En general, cuando una onda viajera se mueve a lo largo de la línea, sufre tres cambios diferentes:

- 1.- La cresta de la onda disminuye en magnitud, o es atenuada.
- 2.- La forma de la onda varía. Esto es, aumenta su elongación, sus irregularidades se alargan y su inclinación se reduce.
- 3.- Las ondas de voltaje y corriente dejan de ser similares en sus formas.

Los últimos dos cambios ocurren juntos y se llama comúnmente distorsión. Es teóricamente posible tener atenuación y no distorsión, pero lo contrario no es cierto.

1.3.2 Efecto de resistencias serie.

Para el caso especial de la línea sin distorsión se tiene:

$$\frac{R}{L} = \frac{G}{C} \quad (1.41)$$

donde

R : resistencia serie por unidad de longitud.

G : conductancia paralela por unidad de longitud.

L : inductancia por unidad de longitud.

C : capacitancia por unidad de longitud.

En líneas con esta característica las ondas son atenuadas sin distorsión alguna. La atenuación a una distancia X es igual a

$$\text{Ate.} = e^{-RX/z} \quad (1.42)$$

La ecuación (1.42) expresa la fracción a la cual la onda es reducida. En las actuales líneas de transmisión el valor de G es tan pequeño que puede ser despreciable por lo que las líneas sí sufren distorsión y atenuación.

Si la distorsión se desprecia se obtiene un factor de atenuación de

$$\text{Ate.} = e^{-RX/2z} \quad (1.43)$$

Por ejemplo, en una línea de cobre 4/0, de impedancia igual a 500 ohmios y resistencia de corriente continua de 0,302Ω por milla, la onda debe viajar 2300 millas para reducir su valor a la mitad del sobrevoltaje. Obviamente la resistencia del conductor bajo estas condiciones es mucho mayor que el del valor de corriente continua. La resistencia de un conductor a la frecuencia de 10^6 Hz. es 18 veces su magnitud cd, la onda sería la mitad de su magnitud luego de ú-

nicamente 130 millas. Sin embargo, la atenuación debido a la resistencia es insignificante comparada con otros factores como el efecto corona.

Resistencia AWG Mils	# hilos	Diámetro o hilo (pulg)	Diámetro exterior (pulg)	Peso en (lb/ml)	Capac. (A)	Imp. (pie)	Res. 50°C (M/ml) dc 60Hz	Kind. 1 pie (M/ml)	Keep. 1 pie (M/ml)
1'000.000	---	0,1644	1,151	16,300	1,300	0,0368	0,0640 0,0685	0,400	0,0901
900.000	---	0,1560	1,092	14,670	1,220	0,0349	0,0711 0,0752	0,406	0,0916
800.000	---	0,1470	1,029	13,040	1,130	0,0329	0,0800 0,0837	0,413	0,0934
750.000	---	0,1424	0,997	12,230	1,090	0,0319	0,0853 0,0888	0,417	0,0943
500.000	---	0,1162	0,814	8,151	840	0,0260	0,1280 0,1301	0,443	0,1004
500.000	---	0,1622	0,811	8,151	840	0,0256	0,1280 0,1301	0,445	0,1005
350.000	---	0,1357	0,679	5,706	670	0,0214	0,1828 0,1845	0,466	0,1058
350.000	---	0,1708	0,710	5,706	670	0,0225	0,1828 0,1845	0,460	0,1044
300.00	---	0,1257	0,629	4,891	610	0,01987	0,2130 0,2150	0,476	0,1080
300.00	---	0,1581	0,657	4,891	610	0,02080	0,2130 0,2150	0,470	0,1068
250.000	---	0,1147	0,574	4,076	540	0,01813	0,2560 0,2570	0,487	0,1108
250.000	---	0,1443	0,600	4,076	540	0,01902	0,2560 0,2570	0,481	0,1094
211.600	4/0	0,1055	0,528	3,450	480	0,01668	0,3020 0,3030	0,497	0,1132
211.600	4/0	0,1739	0,522	3,450	480	0,01579	0,3020 0,3030	0,503	0,1136
167.800	3/0	0,1548	0,464	2,736	420	0,01404	0,3810 0,3820	0,518	0,1171
133.100	2/0	0,1379	0,414	2,170	360	0,01252	0,4810 0,4810	0,532	0,1205
105.500	1/0	0,1228	0,368	1,720	310	0,01113	0,6060 0,6070	0,546	0,1240
66.370	2	0,0974	0,292	1,082	230	0,00883	0,9640 0,9640	0,574	0,1308
66.370	2	0,1487	0,320	1,071	240	0,00903	0,9550 0,9550	0,571	0,1281
66.370	2	.....	0,258	1,061	220	0,00836	0,9450 0,9450	0,581	0,1345
41.740	4	0,1180	0,254	674	180	0,00717	1,5180 1,5180	0,599	0,1349
41.740	4	.....	0,204	667	170	0,00663	1,5030 1,5030	0,609	0,1415
26.250	6	0,0935	0,201	424	130	0,00568	2,4100 2,4100	0,628	0,1419
16.510	8	.....	0,1285	264	90	0,00417	3,8000 3,8000	0,665	0,1552

CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES DESNUDOS DE COBRE (97,3% DE CONDUCTIVIDAD)

Tabla 1.1

Circular Mils Aluminio	Aluminio #hilos Capas	Circular Mils, equl. en cobre	Diámetro exterior (pulg)	Peso en (lb/ml)	Capac. (A)	GMR (pie)	Res. 50°C (Gz/ml) dc	Kind. I pie (Gz/ml)	Kind. I pie (Mz/ml)		
1'590.000	54	3	1'000.000	1,545	10.777	1.380	0,0520	0,0646	0,0684	0,359	0,0814
1'431.000	54	3	900.000	1,465	9.699	1.300	0,0493	0,0718	0,0760	0,365	0,0830
1'272.000	54	3	800.000	1,382	8.621	1.200	0,0465	0,0808	0,0851	0,372	0,0847
1'113.000	54	3	700.000	1,293	7.544	1.110	0,0435	0,0924	0,0969	0,380	0,0867
1'033.500	54	3	650.000	1,246	7.019	1.060	0,0420	0,0994	0,1035	0,385	0,0878
954.000	54	3	600.000	1,196	6.479	1.010	0,0403	0,1078	0,1128	0,390	0,0890
795.000	54	3	500.000	1,093	5.399	900	0,0368	0,1288	0,1378	0,401	0,0917
795.000	26	2	500.000	1,108	5.770	900	0,0375	0,1288	0,1288	0,399	0,0912
636.000	54	3	400.000	0,977	4.319	770	0,0329	0,1618	0,1688	0,414	0,0950
636.000	26	2	400.000	0,990	4.616	780	0,0335	0,1618	0,1618	0,412	0,0946
556.500	26	2	350.000	0,927	4.039	730	0,0313	0,1849	0,1859	0,420	0,0965
556.500	30	2	350.000	0,953	4.588	730	0,0328	0,1849	0,1859	0,415	0,0957
477.000	26	2	300.000	0,858	3.462	670	0,0290	0,2160	0,2160	0,430	0,0988
477.000	30	2	300.000	0,883	3.933	670	0,0304	0,2160	0,2160	0,424	0,0980
397.500	26	2	250.000	0,783	2.885	590	0,0265	0,2590	0,2590	0,441	0,1015
397.500	30	2	250.000	0,806	3.277	600	0,0278	0,2590	0,2590	0,435	0,1006
336.400	26	2	4/0	0,721	2.442	530	0,0244	0,3080	0,3080	0,451	0,1039
336.400	30	2	4/0	0,741	2.774	530	0,0255	0,3060	0,3060	0,445	0,1032
266.800	26	2	3/0	0,642	1.936	460	0,0217	0,3850	0,3850	0,465	0,1074
4/0	6	1	2/0	0,563	1.542	340	0,00814	0,4850	0,5920	0,581	0,1113
3/0	6	1	1/0	0,502	1.223	300	0,00600	0,6120	0,7230	0,621	0,1147
1/0	6	1	2	0,398	769	230	0,00446	0,9740	1,1200	0,656	0,1216
2	6	1	4	0,316	484	180	0,00418	1,5500	1,6900	0,665	0,1285
4	6	1	6	0,250	304	140	0,00437	2,4700	2,5700	0,659	0,1355

CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES DESNUDOS DE ALUMINIO (ACSR)

Tabla 1.2

Clase de Voltaje	Grueso del aislamiento (mils)	Circular Mils ϕ AVG	Peso (lb/1000 pie)	Diámetro conductor (pulg)	GMR de un conductor (pulg)	X Ind. 1 pie (Ω /mi)	Resis. (Ω /mi)	Xcap. (Ω Xm)	Grueso de la vela (mils)
1 KV	75	2'000.000	5.570	1,632	0,633	0,357	0,060	709	115
	75	1'500.000	4.470	1,412	0,546	0,375	0,077	814	110
	60	1'000.000	3.330	1,152	0,445	0,400	0,111	799	100
	60	750.000	2.760	0,998	0,385	0,417	0,147	916	95
	60	500.000	2.090	0,814	0,312	0,443	0,219	1.110	90
	60	350.000	1.670	0,681	0,262	0,464	0,311	1.309	90
	60	250.000	1.370	0,575	0,221	0,485	0,435	1.528	85
	60	4/0	1.240	0,528	0,200	0,497	0,513	1.651	85
	60	3/0	1.080	0,470	0,178	0,511	0,644	1.833	85
	60	2/0	950	0,418	0,159	0,525	0,816	2.031	80
	60	1/0	820	0,373	0,141	0,539	1,030	2.488	80
	60	2	680	0,292	0,106	0,574	1,637	2.776	80

CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES AISLADOS SENCILLOS DE CABLES CONCENTRICOS
(ALUMINIO)

Tabla 1.3

Clase de Voltaje	Grueso del aislamiento (mils)	Circular Mils ó AWG	Peso (lb/ 1000 pie)	Diámetro conductor (pulg)	GMR de un conductor (pulg)	Xind. 1 pie (Ω/mi)	Resis. (Ω/mi)	Xcap. (Ω/mi)	Grueso de la vela (mils)
1 KV	75	2'000.000	9.870	1,632	0,633	0,357	0,040	709	115
	75	1'500.000	7.690	1,412	0,546	0,375	0,050	814	110
	60	1'000.000	5.480	1,152	0,445	0,400	0,070	799	100
	60	750.000	4.370	0,998	0,385	0,417	0,091	916	95
	60	500.000	3.170	0,814	0,312	0,443	0,134	1.110	90
	60	350.000	1.670	0,681	0,262	0,464	0,189	1.309	90
	60	250.000	1.370	0,575	0,221	0,485	0,264	1.528	85
	60	4/0	1.690	0,528	0,200	0,497	0,311	1.651	85
	60	3/0	1.440	0,470	0,178	0,511	0,392	1.833	85
	60	2/0	1.240	0,418	0,159	0,525	0,494	2.031	80
	60	1/0	930	0,332	0,126	0,553	0,786	2.488	80
	60	2	820	0,292	0,106	0,574	0,993	2.776	80

CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES AISLADOS SENCILLOS DE CABLES CONCENTRICOS
(COBRE)

Tabla 1.4

Clase de Voltaje	Grueso del aislamiento (mils)	Circular Mils & AWG	Peso (lb/1000 pie)	Diámetro conductor (pulg)	GMR de un conductor (pulg)	Xind. 1 pie (Ω/mi)	Resis. (Ω/mi)	Xcap. (μf/mi)	Grueso de la vela (mils)
15 KV	175	21000.000	6.630	1.632	0.633	0.356	0.060	1.570	120
	175	15000.000	5.380	1.412	0.546	0.375	0.077	1.790	115
	175	11000.000	4.150	1.152	0.445	0.400	0.111	2.130	105
	175	7500.000	3.540	0.998	0.385	0.417	0.147	2.420	105
	175	5000.000	2.825	0.814	0.313	0.442	0.219	2.870	100
	175	3500.000	2.330	0.681	0.262	0.464	0.311	3.340	95
	175	2500.000	1.940	0.575	0.221	0.484	0.435	3.820	90
	175	4/0	1.800	0.528	0.200	0.496	0.513	4.200	90
	175	3/0	1.620	0.470	0.178	0.512	0.644	4.480	90
	175	2/0	1.480	0.418	0.159	0.524	0.816	4.896	90
	175	1/0	1.380	0.373	0.141	0.539	1.030	5.336	85
	190	2	1.230	0.292	0.106	0.573	1.637	6.721	85

CARACTERISTICAS DE CONDUCTORES AISLADOS SENCILLOS DE CABLES CONCENTRICOS
(ALUMINIO)

Tabla 1.5

CARACTERÍSTICAS DE CONDUCTORES AISLADOS SENCILLOS DE CABLES CONCENTRICOS
(COBRE)

Tabla 1.6

Clase de Voltaje	Grueso del aislamiento (mils)	Circular Mils ó AVG	Peso (lb/1000 pie)	Díámetro conductor (pulg)	GMR de un conductor (pulg)	Xind. 1 pie (Ω/mi)	Resis. (Ω/mi)	Xcap. (pF/mi)	Grueso de la vela (mils)
15 KV	175	2'000.000	11.080	1,632	0,633	0,356	0,041	1,570	120
	175	1'500.000	8.810	1,412	0,546	0,374	0,050	1,790	115
	175	1'000.000	6.350	1,152	0,445	0,400	0,070	2,130	105
	175	750.000	5.240	0,998	0,385	0,417	0,091	2,420	105
	175	500.000	3.940	0,814	0,313	0,442	0,134	2,870	100
	175	350.000	3.110	0,681	0,262	0,464	0,190	3,340	95
	175	250.000	2.500	0,575	0,221	0,484	0,263	3,820	90
	180	4/0	2.300	0,528	0,200	0,496	0,310	4,200	90
	185	3/0	2.100	0,470	0,178	0,512	0,392	4,680	90
	195	2/0	1.940	0,418	0,159	0,524	0,495	5,290	90
	200	1/0	1.710	0,373	0,141	0,539	0,622	5,880	85
	215	2	1.500	0,292	0,106	0,573	0,987	7,270	85

II. DIAGRAMAS DE LATTICE.

2.1 DIAGRAMAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE.

En una red grande, con muchas líneas interconectadas, es obvio que una sencilla onda incidente originará reflexiones y refracciones, en tal cantidad que su análisis resulta complicado. Para resolver este problema, Bewley propuso un esquema de diagramas espacio-tiempo que ha recibido gran aceptación: los diagramas de Lattice.

Para comprender mejor el procedimiento de resolución aplicando los diagramas de Bewley, considérese el caso sencillo de un terminal monofásico con impedancia Z , con impedancia de línea Zl y voltaje de fuente V .



Terminal Monofásico

Figura 2.1

Los diagramas constan de una escala vertical que puede darse en microsegundos, o quizás en múltiplos del tiempo entre los extremos de la línea.

El valor del voltaje en cualquier punto puede ser obtenido, en cualquier instante, sumando todas las ondas que han pasado el punto que se investiga en ambas direcciones hasta el instante en consideración; ésta es una suma algebraica, por lo que hay que tener cuidado con los signos.

En el terminal de la línea de la figura 2.1 ocurren las siguientes fluctuaciones de voltaje:

$t < \tau$	$V = 0$
$\tau < t < 3\tau$	$V = b_1.V_1$
$3\tau < t < 5\tau$	$V = 2.b_1.V_1 + a_1.a_2.b_1.V_1$

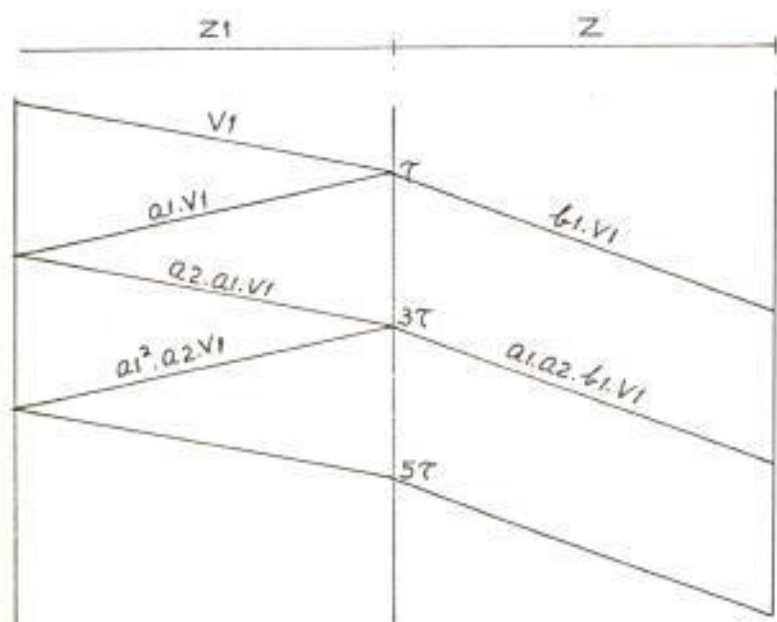


Diagrama de Lattice del terminal monofásico

Figura 2.2

Los diagramas de lattice pueden también ser dibujados para las ondas de corriente. Estas ondas de corriente son fácilmente obtenidas de sus correspondientes ondas de voltaje mediante la relación:

$$I = \pm \frac{V}{Z_0}$$

El signo de la ecuación dependerá de la dirección de la onda.

A continuación se presentan los diagramas de lattice de voltaje y corriente para el caso de un corto circuito:

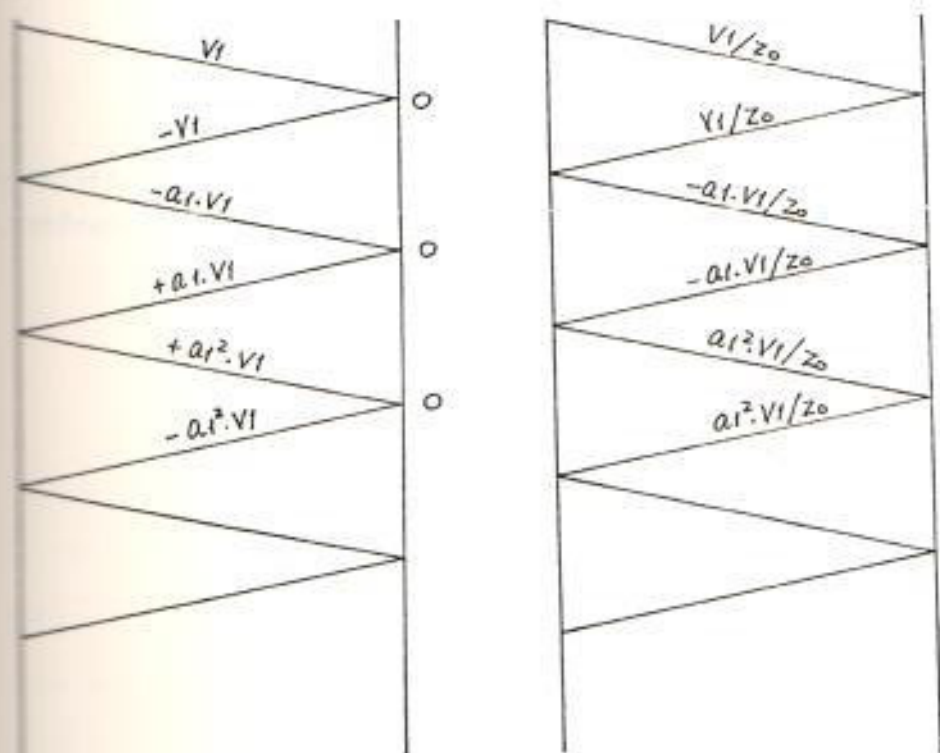


Diagrama de Lattice de un Corto Circuito.

Figura 2.3

En la figura 2.4 se presenta un circuito cuyo diagrama de lattice se encuentra a continuación.



//////
Circuito con 3 Impedancias diferentes

Figura 2.4

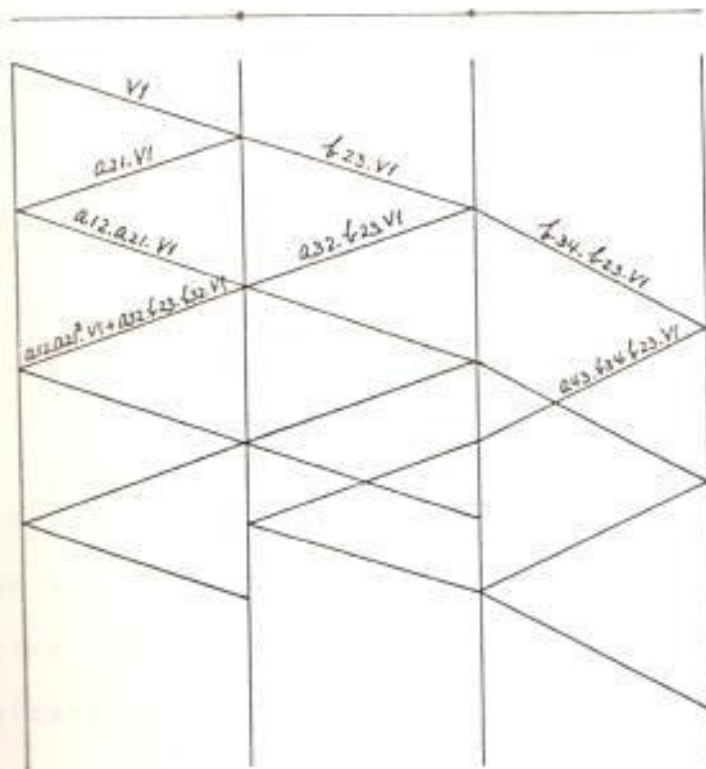
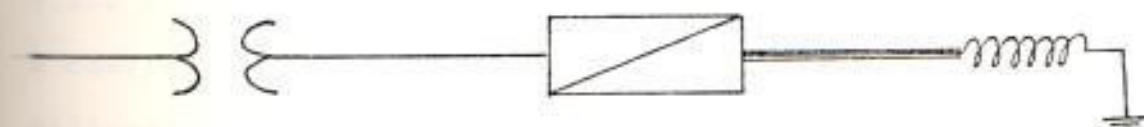


Diagrama de Lattice del circuito anterior
Figura 2.5

2.2 ELABORACION DE PROGRAMA DE COMPUTADORA.

2.2.1 Metodología.

El objetivo principal es elaborar un programa de computación que calcule los sobrevoltajes que se producen en las diferentes líneas que constituyen un circuito formado por: un transformador, alimentadora al centro de carga, alimentación al motor y el motor. (Figura 2.6)



Circuito del Programa Elaborado

Figura 2.6

El cálculo de sobrevoltajes permite hallar el máximo valor producido en los puntos de transición y determinar así las características de los equipos de protección y el lugar donde deben ubicarse. Estos cálculos se realizan en base a los diagramas de Bewley descritos al inicio del capítulo, es decir, analizando las reflexiones y refracciones sucesivas que la onda incidente original genera en el circuito,

debido a las diferentes impedancias características conectadas en el sistema.

El programa "ARREST", así llamado, es aplicable cuando los tiempos de programación de la onda en los cables entre el transformador y el tablero de control, y entre éste y el motor son similares, y cuando el tiempo de programación en el devanado del motor es mayor que los anteriores. Estas limitaciones se ajustan a lo que sucede en la práctica.

2.2.2 Variables.

A continuación se detalla el significado de las variables utilizadas en el programa ARREST:

- W1 (80) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes que se producen en el conductor entre el transformador, y el tablero de control, expresados en Kilovoltios.
- W2 (80) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes que se producen en el conductor entre el tablero de control y el motor, expresados en Kilovoltios.
- W3 (80) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes que se producen en el motor, expresados en Kilovoltios.
- W (80,1) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes que se

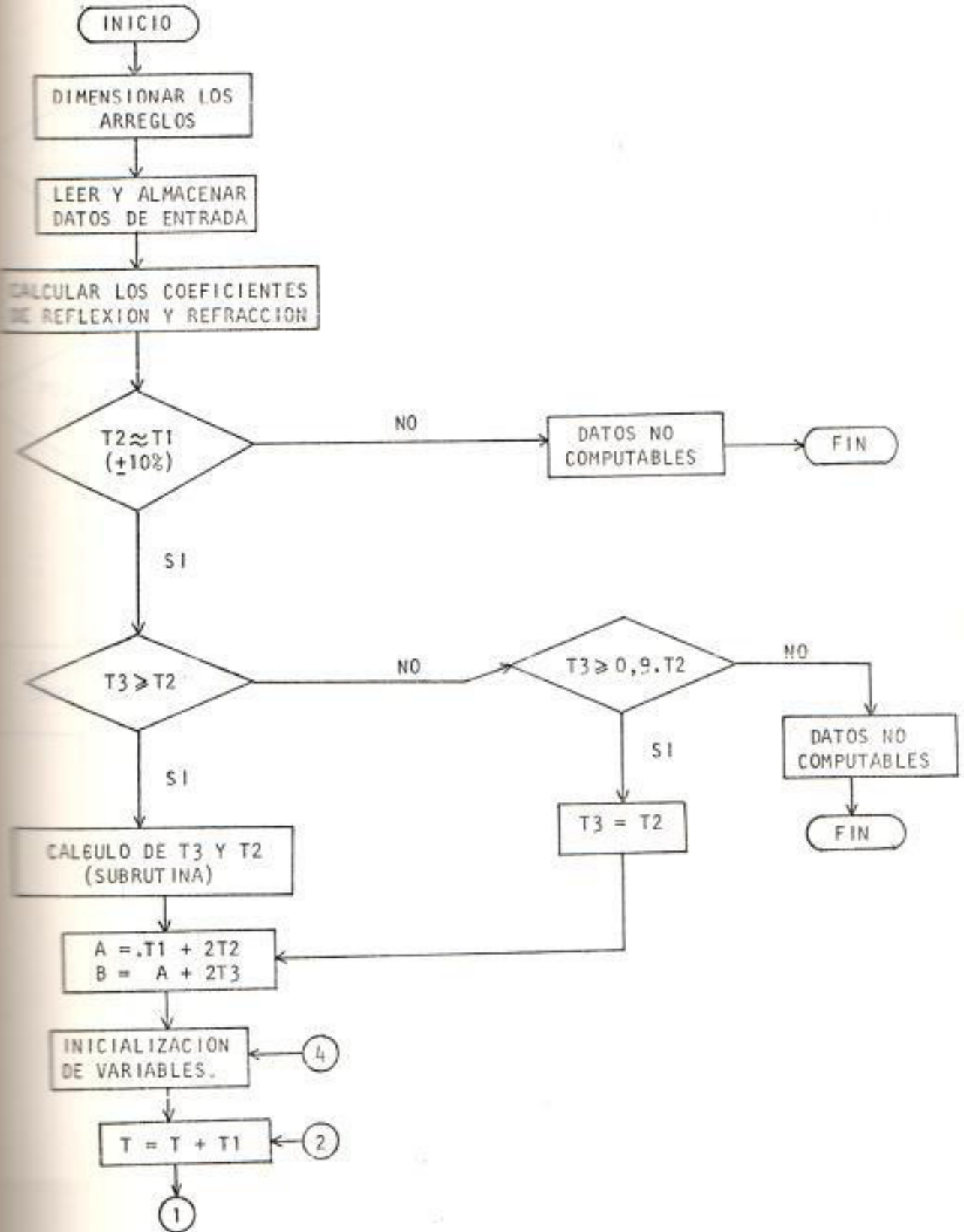
producen en la unión entre el transformador y la línea que va al tablero de control, expresados en Kilovoltios.

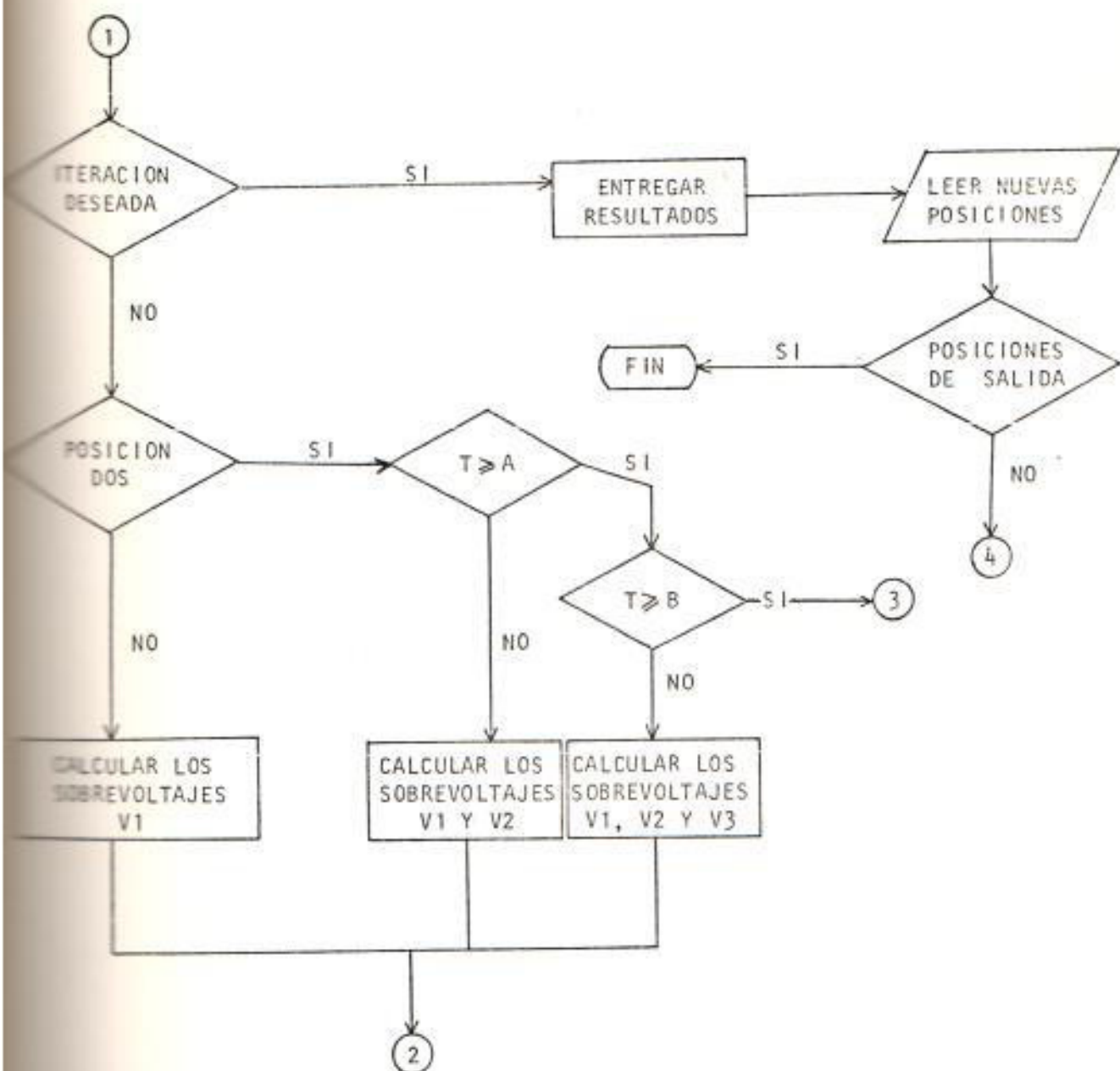
- B (80,2) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes que se producen en la unión entre la línea del transformador al tablero y la línea del tablero al motor expresados en Kilovoltios.
- B (80,3) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes que se producen en los terminales del motor expresados en Kilovoltios.
- A (20) : Arreglo que almacena los sobrevoltajes de las líneas para facilitar la visualización gráfica de la respuesta, expresados en kilovoltios.
- Z1 : Impedancia del transformador, expresada en ohmios.
- Z2 : Impedancia de la alimentadora al centro de carga, expresada en ohmios.
- Z3 : Impedancia del cable hacia el motor, expresada en ohmios.
- Z4 : Impedancia del motor, expresada en ohmios.
- T1 : Tiempo de propagación en la alimentadora, expresado en microsegundos.
- T2 : Tiempo de propagación en el cable al motor, expresado en microsegundos.

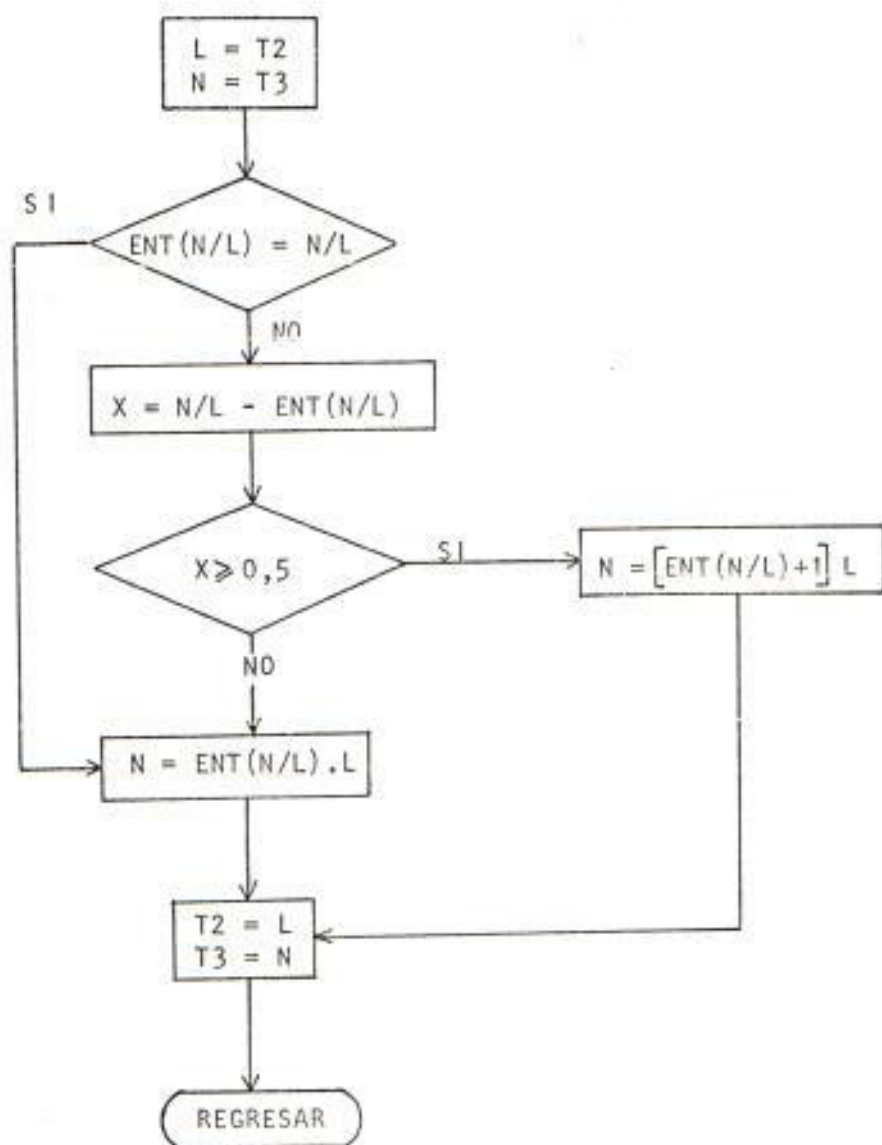
- Bil 1 : Nivel básico de aislamiento de la alimentadora, expresado en Kilovoltios.
- Bil 2 : Nivel básico de aislamiento del cable hacia el motor, expresado en Kilovoltios.
- Bil 3 : Nivel básico de aislamiento del motor, expresado en Kilovoltios.
- T4 : Tiempo entre operación y descarga del pararrayos, expresado en microsegundos.
- T5 : Tiempo al cual se produce el voltaje máximo de operación del pararrayos, expresado en microsegundos.
- KV1 : Voltaje máximo de operación del pararrayos, expresado en Kilovoltios.
- VLA : Voltaje de descarga del pararrayos, expresado en Kilovoltios.
- VIN : Voltaje incidente original luego del transformador, expresado en Kilovoltios.
- KVM : Rata máxima de crecimiento de voltaje en los devanados del motor, expresada en Kilovoltios/microsegundos.
- S : Posición del pararrayos en el circuito.
- AL43 : Coeficiente de reflexión en el neutro del motor.
- C1 : Posición del banco de capacitores en el circuito.

- C2 : Capacitancia del banco de capacitores, expresada en microfaradios.
- VM(1) : Máximo sobrevoltaje en la unión entre el transformador y la línea que va al tablero de control expresado en Kilovoltios.
- VM(2) : Máximo sobrevoltaje en la unión entre la línea del transformador al tablero y la línea del tablero al motor, expresado en Kilovoltios.
- VM(3) : Máximo sobrevoltaje en los terminales del motor, expresado en Kilovoltios.
- WAZ1 : Tiempo al cual se produce VM(1), expresado en microsegundos.
- WAZ2 : Tiempo al cual se produce VM(2), expresado en microsegundos.
- WAZ3 : Tiempo al cual se produce VM(3), expresado en microsegundos.
- S : Variable que indica la actuación o no del pararrayos.
- VM(1) : Máximo sobrevoltaje en el conductor entre el transformador y el tablero de control, expresado en Kilovoltios.
- VM(2) : Máximo sobrevoltaje en el conductor entre el tablero de control y el motor, expresado en Kilovoltios.

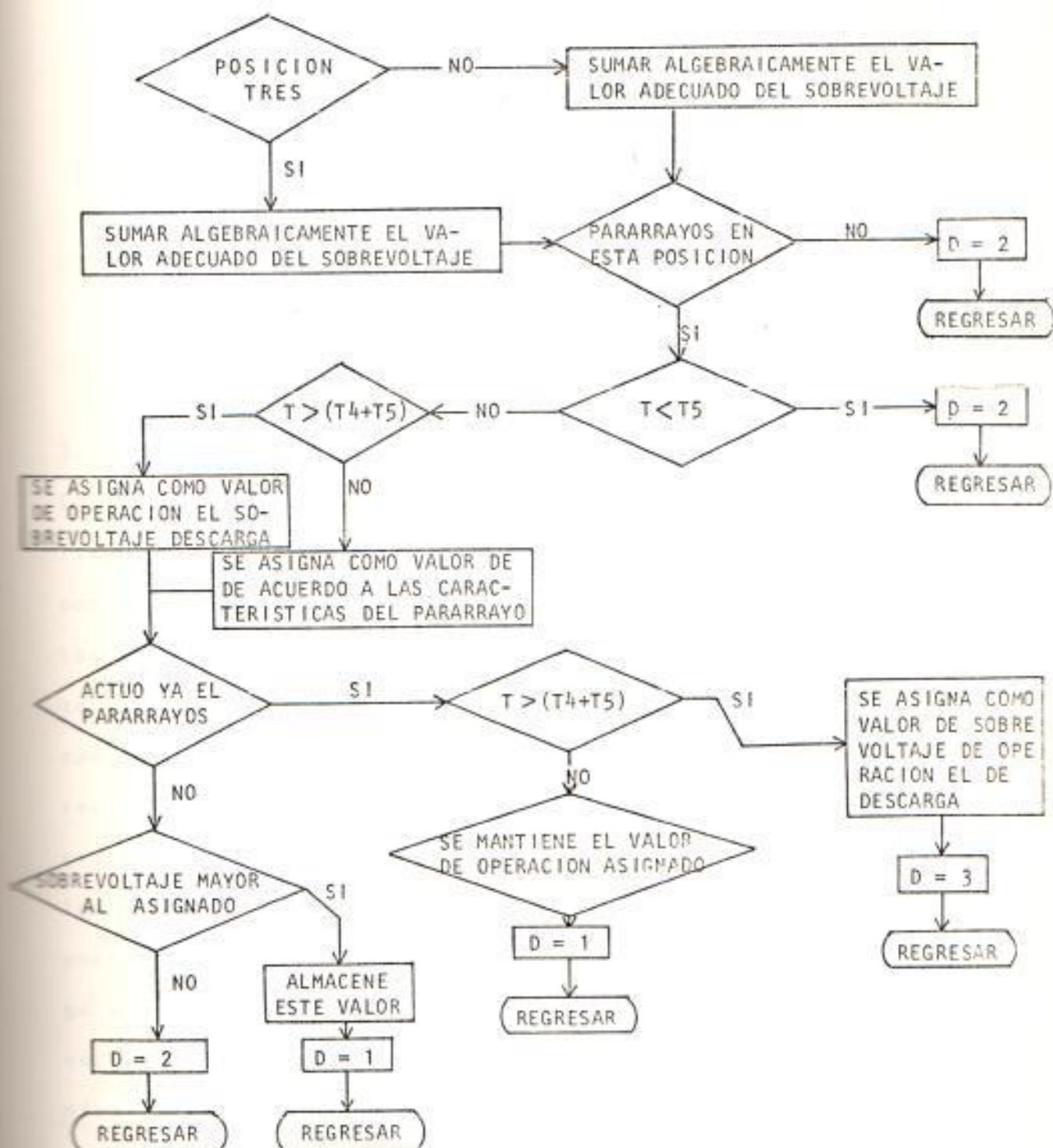
2.2.3 Diagrama de Flujo





SUBROUTINA PARA FIJAR LOS VALORES DE T2 Y T3

SUBROUTINA PARA CALCULAR LOS SOBREVOLTAJES



III. EQUIPOS DE PROTECCION.

3.1 INTRODUCCION.

Los sobrevoltajes pueden ser causados por descargas atmosféricas, conexión o desconexión de elementos de un sistema, o por inicio o interrupción de fallas.

Las descargas atmosféricas generan sobrevoltajes por contacto directo (impactos en la línea) o inducidos (impactos cercanos a la línea). Los sobrevoltajes debidos a impactos directos pueden llegar a muchos millones de voltios y con corrientes de descarga de muchos miles de amperios, en cambio los sobrevoltajes inducidos más frecuentes son del orden de pocos cientos de miles de voltios con corrientes de descarga entre 50 y 2000 A. Los sobrevoltajes por maniobras rara vez superan en 1.73 veces el voltaje de línea, por lo que a niveles de voltaje bajos, no son peligrosos (valores menores a 300 KV.). Para proteger las líneas y los equipos contra estos sobrevoltajes se utilizan pararrayos, capacitores

y técnicas de protección como apantallamiento. Para determinar la protección adecuada es muy importante conocer los niveles de aislamiento de los equipos a proteger, la causa más frecuente de interrupción en un sistema es el rompimiento del aislamiento. En general:

- 1.- El nivel de aislamiento del equipo a protegerse debe seleccionarse en base al máximo sobrevoltaje originado por maniobras en el sistema.
- 2.- Los sobrevoltajes por impactos directos deben ser contrarrestados usando equipos de protección.
- 3.- Los niveles de aislamiento y los equipos de protección, deben coordinarse de tal manera que las partes más vulnerables y costosas de los equipos sufran el mínimo daño.

Los sobrevoltajes debidos a descargas atmosféricas dependen de las características del impacto (forma de onda, magnitud de corriente, lugar del impacto y de los parámetros de las líneas como longitud del vano, impedancia de conductores). Cuando un rayo impacta en una línea, la corriente circulará en ambas direcciones en el conductor impactado, y el sobrevoltaje originado puede producir descargas y fallas.

Siempre se ha considerado que un pararrayos de óptimas características debería:

- 1.- Entrar a conducir a cierto valor de voltaje sobre el rango de voltaje del pararrayos.
- 2.- Mantener este voltaje, o con pequeños cambios, cuando el sobrevoltaje está presente.
- 3.- Cesar la conducción a un valor de voltaje cercano al valor al cual empezó a conducir.
- 4.- Tener una curva V_{vsT} debajo de la curva V_{vsT} del equipo a proteger, y con suficiente margen entre ellas a fin de evitar riesgos por factores como polaridad, humedad, densidad del aire, distancia entre los equipos.

Tal pararrayos debería conducir sólo la corriente requerida para reducir el sobrevoltaje al nivel de protección del pararrayos; si un pararrayos mantiene un nivel inferior durante parte del período de conducción, absorberá más corriente y en consecuencia, más energía.

Para la aplicación del pararrayos deben seguirse los siguientes pasos:

- 1.- Seleccionar el rango del pararrayos a colocarse.
- 2.- Seleccionar el lugar donde será ubicado.
- 3.- Seleccionar el tipo o clase de pararrayos.

El rango del pararrayos se escoge en base al máximo sobrevoltaje al que puede estar expuesto a frecuencia nominal.

El lugar ideal para colocar un pararrayos es en los terminos

les del equipo a protegerse; sin embargo, por circunstancias que aparecen en la práctica y por factores económicos, en muchas ocasiones los pararrayos deben ubicarse en sitios alejados del equipo. En estas condiciones, es importante conocer el valor de sobrevoltaje que llega al aparato a proteger.

La probabilidad de impacto de un rayo en una línea dependerá del grado de protección que se tenga, de la longitud de las líneas, de la frecuencia de tormentas en el lugar (con un valor de nivel isoqueraúnico de 30, la probabilidad de que una línea reciba un impacto directo es de 0,70 a 1,00 impactos por milla y por año).

Algunos datos estadísticos sobre descargas atmosféricas pueden encontrarse en el Apéndice B).

Es importante tomar en cuenta el efecto de la atenuación de la onda, que es resultado de la acción de resistencias, efecto piel y efecto corona. La atenuación también depende de la forma, magnitud y duración del sobrevoltaje.

Un pararrayos tiene mayor eficiencia cuando:

- 1.- Su voltaje de descarga y de operación son bajos.
- 2.- La rata de crecimiento de la onda de voltaje es pequeña.
- 3.- La longitud del cable hacia tierra es mínima.
- 4.- Está lo más cercano posible del equipo a protegerse.

Cuando la rata de crecimiento de la onda supera la máxima rata permitida por el pararrayos, se hace necesario utilizar capacitores de protección. Un capacitor cumple 3 funciones principales:

- 1.- Disminuye la rata de crecimiento del voltaje incidente.
- 2.- Disminuye el pico de voltaje para ondas cortas.
- 3.- Disminuye el voltaje de operación del pararrayos en paralelo en alrededor del 10%.

3.2 EQUIPOS DE PROTECCION.

3.2.1 El Pararrayos.

Es un dispositivo que se ubica cerca del equipo a protegerse y que opera cuando se presenta una sobretensión descargando la corriente a tierra y limitando la amplitud de la sobretensión a valores que no sean peligrosos para los equipos en el sistema. Su principio de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos electrodos cuya separación está fijada de acuerdo con la tensión a la cual va a operar.

Las características fundamentales de un pararrayos son:

- 1.- Voltaje nominal.- Es el máximo voltaje de frecuencia nominal permitido entre línea y tierra y que puede aplicarse continuamente sin que cambien sus características de opera-

ción.

2.- Voltaje de operación.- Se refiere a un rango de voltaje, dentro del cual el pararrayos empieza a operar, para cierta rata de crecimiento.

3.- Voltaje de descarga.- Es un rango de tensión, dentro del cual se encuentra el valor al que el pararrayos descarga luego de su operación.

4.- Voltaje residual.- Es la tensión que aparece entre los terminales de línea y tierra durante la descarga del pararrayos.

5.- Voltaje de restablecimiento.- Voltaje que aparece en el pararrayos luego de la interrupción de la corriente del rayo

Los primeros pararrayos fueron simples electrodos separados cierta distancia. Un mayor adelanto se logró con las resistencias no lineales, que permiten mantener bajos niveles de protección. Actualmente hay limitadores de corriente, que usados con resistencias no lineales han permitido reducir los niveles de protección para sobrecorrientes y mantener un voltaje más constante durante la circulación de la corriente en el pararrayos. Con el uso de los limitadores de corriente, se hizo posible, entre otras cosas:

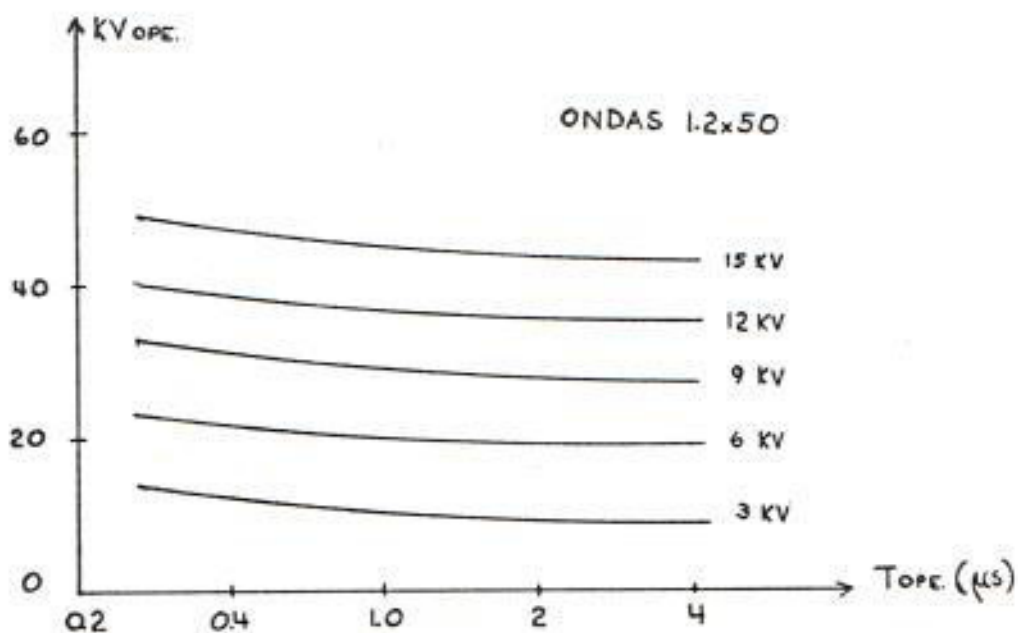
1.- Reducción del voltaje de descarga, por la reducción de

la resistencia del elemento válvula.

2.- Reducción del tamaño del pararrayos, por la disminución en la energía absorbida.

3.- Reducción en los niveles de protección para altas tensiones.

En la siguiente figura puede notarse la variación del voltaje de operación de un pararrayos tipo intermedio en función del tiempo.

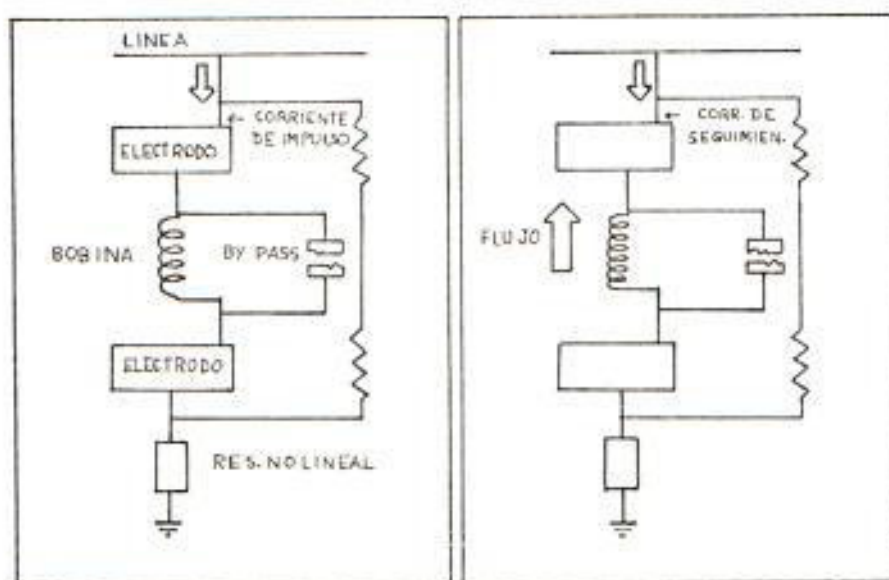


Gráfica de Operación de un Pararrayos tipo Intermedio

Figura 3.1

La función complementaria del pararrayos es prevenir el flujo de corriente a tierra luego de haber descargado la corriente de impulso inicial, es decir, evitar la corriente que sigue luego del primer cero de corriente. Los pararrayos que pasan la prueba del ciclo de trabajo tienen amplia capacidad de disipación de calor y cumplen estos requerimientos. El apéndice B señala las pruebas que se realizan en los pararrayos.

En general, los pararrayos están formados por: el espacio entre los elementos, que actúa como interruptor de rápida acción, la bobina y la válvula de material resistivo no lineal que se encuentran dispuestas en serie y herméticamente selladas en porcelana.



Operación del Pararrayos
Figura 3.2

El material del pararrayos es en general carburo de silicio. Está formado por una serie de discos o ruedas. Es importante que el arco que se produce al presentarse un sobrevoltaje sea apagado cuando éste cesa, de lo contrario, al persistir, sería destruido por la corriente que continuaría circulando.

Las normas indican que el voltaje de operación de un pararrayos menor a 60 KV, debe ser no menor a 1,5 veces el voltaje nominal del pararrayos. Entonces, el mínimo pico de voltaje a 60 Hz será $1,5 \times \sqrt{2}$, que es 2,1 veces el voltaje del pararrayos. En la práctica, los pararrayos tipo estación cumplen con esta norma, los de distribución lo mantienen alrededor a un 25% más arriba que el mínimo (2,65 veces el voltaje nominal del pararrayos).

Los pararrayos deben ser capaces de descargar sobrevoltajes, de altas energías, sin cambios en su nivel de protección o daños en ellos o en equipos adyacentes.

Los pararrayos pueden clasificarse en:

1.- Pararrayos autovalvulares: tienen chapas de electrodos conectadas en serie por medio de resistencias variables cuya función es dar una operación más precisa y sensible. Se

emplean en los sistemas que operan a altas tensiones ya que representan una gran seguridad en operación.

2.- Pararrayos tipo resistencia variable: basan su principio de operación en dos electrodos conectados en serie con una resistencia variable. Se usan cuando el sistema es a voltaje mediano y tiene mucha aceptación en los sistemas de distribución.

Los pararrayos tipo válvula (de resistencia variable), se clasifican a su vez en:

	RANGO DE VOLTAJE	I DESCARGA
- estación	2,6 a 765 KV	10-100 KA
- intermedios	2,6 a 150 KV	5-65 KA
- distribución	2,6 a 37 KV	5-65 KA
- secundarios	170 a 650 V	1,5-20 KA (1)

El voltaje en el pararrayos durante su operación es:

$$V(i) = C \cdot i_1^{1-a} \quad (3.1)$$

$$\text{ó} \quad i = C \cdot V^{\frac{1}{1-a}} \quad (3.2)$$

donde V : Máximo voltaje durante la descarga.

i : corriente pico asociada con V.

C : constante del material.

a : 0,7 a 0,8

(1) Datos estadísticos obtenidos por la Universidad del Estado de Ohio.

En los pararrayos de carburo de silicio se tiene que:

$$a \approx 0.75$$

$$\frac{1}{1-a} = 4$$

$$i = c \cdot V^4 \quad (3.3)$$

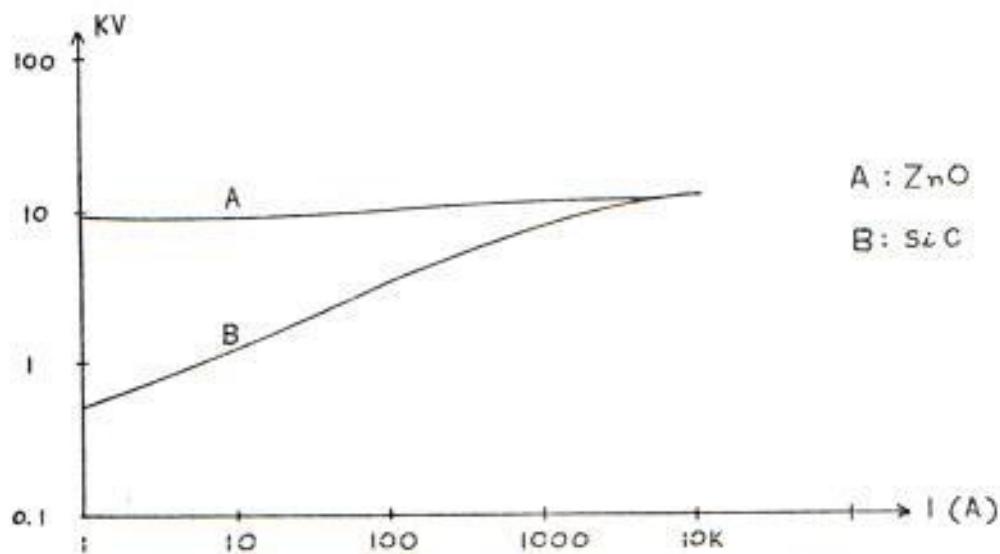
En los pararrayos de óxido de zinc se tiene que:

$$a \approx 0.96$$

$$\frac{1}{1-a} = 25$$

$$i = c e^{25} \quad (3.4)$$

Puede observarse en la figura 3.3 las características de un pararrayos tipo válvula de 6 KV tanto de carburo de silicio como de óxido de zinc.



Característica de un Pararrayos tipo válvula

Figura 3.3

Las características de un pararrayos de óxido de zinc, son entre otras: no tiene espacios (en inglés gaps) en serie, posee rápida iniciación de operación, su corriente luego de la descarga (a voltaje nominal) es despreciable, la disipación de energía es mínima. El voltaje entre electrodos, (gaps), depende de la longitud del arco, de la magnitud de la corriente y del tipo de entriamiento.

Además, permite una mejor recuperación por la simplicidad del diseño, hay una mejor actuación cuando en el sistema se tienen bajas impedancias, su operación es entonces suave, es decir, los equipos no están sujetos a descargas transientes.

El desarrollo de los pararrayos de óxido de zinc, basados en resistores no lineales, ha progresado al punto que ya existen discos de alta energía que evitan el uso de los espacios en serie y con características de protección superiores a los diseños anteriores.

Actualmente el pararrayos tipo válvula es el más usado. Sus principales elementos son la válvula y el espacio entre los electrodos (gaps). Este asegura las características de operación deseadas. La válvula posee una resistencia no lineal cuyo valor es:

$$RA = \frac{\alpha}{E^k} \quad (3.5)$$

donde: α = constante que depende del material del pararrayos.

RA = resistencia de la válvula.

E = voltaje a través de la resistencia de la válvula.

k = constante de diseño, que permite alta resistencia a bajos voltajes (y corriente) y muy baja a altos voltajes (y corriente).

La alta resistencia permite la recuperación entre electrodos para evitar la corriente luego de la descarga.

Las características de protección del pararrayos tipo válvula están asociadas con las dos unidades básicas: el voltaje de operación, que se relaciona con el espacio entre electrodos, y el voltaje de descarga, que se relaciona con la válvula. El sobrevoltaje al cual el espacio entre electrodos (gap) empieza a conducir (voltaje de operación), depende de su forma de onda: a mayor rata de crecimiento descargará a valores más altos, a pesar que los modernos pararrayos no establecen mucha diferencia.

Los pararrayos tipo válvula están compuestos principalmente de óxido de zinc, pero contienen pequeñas cantidades de óxidos metálicos que producen la característica de resistencia no lineal del material.

La operación de un pararrayos consiste en lo siguiente: cuando un sobrevoltaje llega a los terminales del pararrayos, pro

duce la ruptura en el vacío que hay entre los electrodos. La descarga es más consistente por la inclusión de un "pre-ionizador" que mantiene un número alto de electrones en el vacío y listos para iniciar la descarga cuando aparece el sobrevoltaje. La alta corriente originada desarrolla rápidamente un voltaje a través de la bobina suficiente para provocar que el by-pass descargue, lo cual saca a la bobina del circuito y deja sólo la impedancia del elemento válvula y del circuito al cual está conectado. Durante esta etapa el voltaje desarrollado es esencialmente la caída en el elemento resistivo IR (Fig. 3.2). Cuando las condiciones de frecuencia nominal se establecen, la impedancia de la bobina es mucho menor, lo que ocasiona que el arco del by-pass sea inestable y se extinga (la corriente circulará por la bobina). El campo magnético creado por la corriente que circula por la bobina crea un arco en el vacío y que se elimina luego del primer cero de corriente, elongando y enfriando el arco, de esta forma el pararrayos limita el sobrevoltaje.

Cuando el pararrayos opera, la onda de respuesta es el valor negativo de la diferencia entre el voltaje que aparecería en el pararrayos si no operara y el voltaje desarrollado a través de la impedancia del pararrayos operando. Esta

onda es inyectada a todos los elementos conectados al mismo nodo que el pararrayos.

En el apéndice C se encuentran tablas que detallan las características de los diferentes tipos de pararrayos.

3.2.2 CAPACITORES DE PROTECCIÓN.

El grado de protección en el sistema depende de la magnitud del sobrevoltaje y de la rata de crecimiento de la onda; a su vez, la rata de crecimiento es función de algunos factores como magnitud y forma de la onda, configuración del circuito, impedancia de la onda viajera.

Los capacitores de protección tienen las siguientes funciones:

- 1.- Disminuyen la rata de crecimiento del voltaje incidente.
- 2.- Disminuyen el valor del pico de sobrevoltaje para ondas cortas.
- 3.- Disminuyen el voltaje de operación del pararrayos en paralelo en alrededor del 10%.

Las máquinas rotativas soportan poco sobrevoltaje de impulso ya que el aislamiento entre vueltas puede ser dañado, por lo que si se sobrepasa en más del 30% el voltaje pico de la prueba 60 Hz-1 minuto, o si lo supera en menos de 5 microsegundos, la máquina debe protegerse con capacitores.

Es conveniente ubicar el capacitor en el lugar más seguro y fácil de instalar; generalmente existen varias máquinas en el sistema por lo que es adecuado ubicarlo a la entrada del conjunto.

Una desventaja de colocar el pararrayos lejos del equipo a proteger es la posibilidad de que se doble el voltaje incidente. Esto no sucede si, un capacitor se coloca en los terminales del equipo a proteger, ya que el voltaje debe primero cargar el capacitor.

Cuando el equipo a proteger está en paralelo con el capacitor, el voltaje a través del devanado del equipo puede elevarse sólo tan rápidamente como puede cargarse el capacitor a través de la línea o barra por la cual circula el sobrevoltaje.

Es efectivo y económico el uso de capacitores en cada equipo a proteger (por ejemplo motores), y un pararrayos de protección para el conjunto. Los capacitores son particularmente efectivos contra sobrevoltajes de corta duración, la energía de éstos es tal que puede ser absorbida por el capacitor con poca variación de voltaje.

3.3 SELECCION DEL PARARRAYOS Y CAPACITOR EN LA PROTECCION DE UN SISTEMA INDUSTRIAL.

El procedimiento de selección de las características del pa

pararrayos con relación al aislamiento a ser protegido puede reducirse a los siguientes pasos:

1.- Determinación del máximo voltaje de falla de línea a tierra en el punto donde se va a instalar el pararrayos. Debe considerarse el efecto de aterrizamiento determinado por las relaciones X_0/X_1 y R_0/R_1 , de acuerdo a la Tabla 3.1 donde:

X_0 : reactancia de secuencia cero visto desde el punto de instalación del pararrayos.

R_0 : resistencia de secuencia cero visto desde el punto de instalación del pararrayos.

X_1 : reactancia subtransiente de secuencia positiva visto desde el punto de instalación del pararrayos.

R_1 : resistencia de secuencia positiva visto desde el punto de instalación del pararrayos.

2.- Estimación de la forma de onda y magnitud de la corriente más severa de descarga en el pararrayos.

3.- Selección del voltaje nominal del pararrayos.

4.- Determinación de los niveles de protección contra sobrevoltajes de impulso y maniobras determinados por el pararrayos escogido.

5.- Cálculo teórico de los máximos sobrevoltajes de impulso que puede ocurrir en los equipos a proteger. Se debe tener en cuenta la ubicación del pararrayos y su separación con

los equipos a proteger.

6.- Determinación de la resistencia dieléctrica del aislamiento a ser protegido.

El nivel de protección de voltaje es el más alto de los siguientes valores: voltaje de operación ante una onda de impulso normalizada, voltaje de descarga, y voltaje de operación ante una onda con cierta rata de crecimiento dividido - para 1,15 (esta reducción compensa aproximadamente la corta duración en el cambio brusco de la onda de voltaje justo antes de su valor máximo). (1)

Para la coordinación de aislamiento debe tomarse en cuenta que el voltaje de operación depende de:

- 1.- Condiciones ambientales: humedad, temperatura, presión;
- 2.- Forma y distribución de los electrodos.

Si el equipo a proteger, tiene un bajo nivel de aislamiento, será necesario de mejores pararrayos, un aterrizamiento efectivo y llegar a un compromiso entre la seguridad y el costo del equipo. (a menor BIL, menor es el costo del equipo).

Ondas de voltaje con frentes muy inclinados pueden exceder el nivel de protección en una subestación, este exceso de-

(1) W. Diesendorf, "Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems".

pende de la inclinación de la onda (rata de crecimiento) y de los parámetros del circuito. La ubicación de un pararrayos cerca a un transformador ofrece seguridad económica debido al alto costo del aislamiento de un transformador.

El Bil es a menudo determinado con sólo aumentar en un 25 á 30% el nivel de protección del pararrayos. Un margen adicional de seguridad de un 10% es conveniente por la posibilidad de fallas en la calidad del aislamiento del equipo y/o porque las características del pararrayos podrían deteriorarse con el tiempo. (1)

Una forma más rápida de determinar el pararrayos a utilizar se es:

1.- Determinar el coeficiente de aterrizamiento del sistema

$$C.A. = \frac{V_{\max} \text{ LT}}{V_{LL}} \times 100 \quad (3.6)$$

donde:

C.A. : coeficiente de aterrizamiento.

$V_{\max} \text{ LT}$: máximo voltaje de falla de línea a tierra.

V_{LL} : voltaje nominal de línea a línea.

(1) W. Diesendorf, "Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems".

Descripción	Clase	Relaciones de límite		Coefic. aterr.
		X_0/X_1	R_0/R_1	
Aterrizado	A	*	*	75%
Efectivamente aterrizado	B	0 a 3	0 a 1	80%
Aterrizado	C	3 a ∞	1 a ∞	100%
No efectivam. aterrizado	D	-40 a 0	---	80%
No aterrizado	E	0 a -40	---	---

* Relación no establecida.

CLASIFICACION DE SISTEMAS POR EL METODO DE
CONEXION A TIERRA SEGUN LAS NORMAS A.S.A.

Tabla 3.1

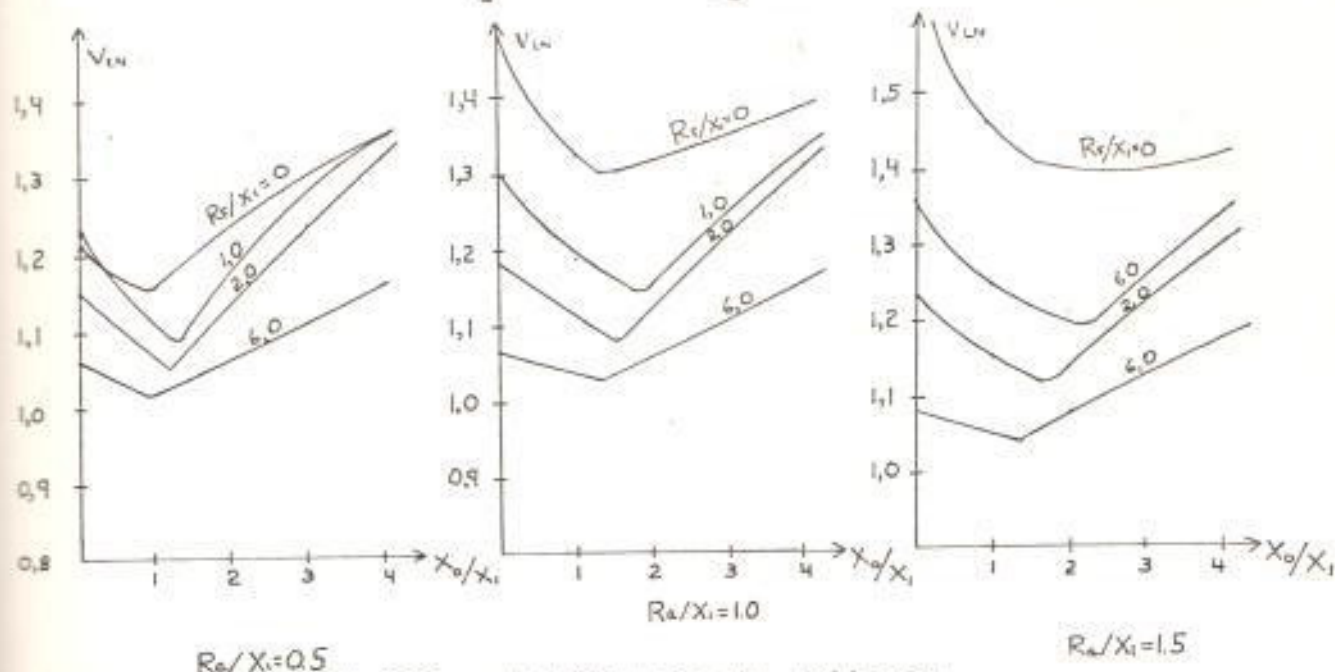
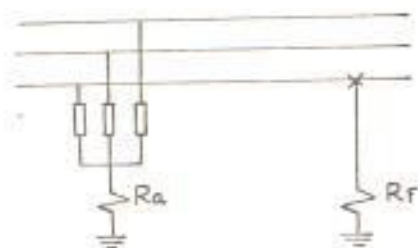


Gráfico del Voltaje de Falla en función de la resistencia de falla.

Figura 3.4

2.- Hallar el máximo voltaje esperado de línea a línea.

Se suele utilizar un factor entre 1.05 y 1.20 veces el voltaje nominal de línea a línea.

También puede usarse 1.25 en sistemas aterrizados y cables desnudos (1.05 por la regulación de voltaje y 1.20 por máximo sobrevoltaje durante la falla en las fases no afectadas). En circuitos de distribución es mejor incluir los parámetros:

R_1 , X_0 , X_1 , R_0 , para calcular el rango del pararrayos. Cuando el sistema es aislado se usa el factor 1,73.

3.- Determinar el rango del pararrayos.

Ejemplo:

$$\text{si } R_1 = 0$$

$$R_2 = 0$$

$$R_0/X_1 = 0,5$$

$$X_0/X_1 = 2,5 \quad VLL = 345 \text{ KV}$$

entonces:

$$1.- C.A. = 75$$

$$2.- V_{maxLL} = 1,05 \times 345 = 362 \text{ KV.}$$

$$3.- \frac{75 \times 362}{100} = 272$$

Luego se escoge el valor del pararrayos más cercano: 276 KV. Sin embargo, la selección del pararrayos no es tan sencilla, ya que existen algunas diferencias en las características de protección y de durabilidad de los pararrayos. Sobre el tamaño del equipo a proteger, se puede seguir la siguiente guía:

Clase estación: para componentes de más de 7,5 MVA y grandes máquinas rotativas.

Clase intermedia: para componentes de 1 a 20 MVA en subestaciones y máquinas rotativas.

Clase distribución: para aparatos de distribución, peque-

ñas máquinas rotativas y transformadores tipo secos.

Excesivas corrientes de descarga son causa principal para las fallas de los pararrayos, por lo que es necesario conocer el valor de esa corriente para asegurar la operación correcta del pararrayos. La corriente de descarga es mayor a voltajes mayores, su valor, asumiendo que el sobrevoltaje no excederá a 1,2 veces el BIL de la línea, puede encontrarse así:

$$ID = \frac{2,4 \times BIL}{ZL + ZARR} \quad (3.7)$$

donde:

ID : corriente de descarga.

BIL : nivel básico de aislamiento de la línea.

ZL : impedancia de la línea.

ZARR : impedancia del pararrayos.

De esta ecuación puede notarse el rol limitador de corriente que tiene la impedancia.

En el caso de sistemas efectivamente protegidos, ID es relativamente baja, por lo que no tiene mucha importancia (1).

En instalaciones que no están efectivamente protegidas, se

(1) George Walsh: "A review of lightning protection and grounding practices".

experimentan muy altas corrientes, muy altos sobrevoltajes y se pueden tener gradientes muy elevados. En zonas donde las tormentas son frecuentes es aconsejable usar pararrayos tipo estación o intermedios. Es importante que las líneas estén protegidas por lo menos 800 metros alrededor de la subestación (apantallamiento) o a través de mástiles.

Las líneas se protegen usando el llamado cable de guarda, el mismo que debe aterrizarse junto a cada poste a través, de una resistencia o directamente a tierra.

Los capacitores se instalan con el objeto de disminuir la rata de crecimiento de la onda de voltaje incidente. Se colocan cuando la onda crece a una velocidad mayor a la rata que puede soportar el equipo a proteger u otro equipo en el sistema. Por ejemplo, si la onda crece a razón de 20 KV./microsegundo, y el aislamiento de una máquina soporta como máximo una rata de 15 KV./microsegundo, deberán instalarse capacitores en los terminales del motor.

Otra forma de determinar la instalación o no de los capacitores es, como se mencionó en la sección 3.2.2: observar si se sobrepasa en más del 30% el voltaje pico de la prueba a 60 Hz-1minuto, o si este voltaje pico se supera en menos de 5 microsegundos; si así sucede, los capacitores se hacen sumamente necesarios.

A continuación se presenta una tabla que puede servir como guía en la selección de pararrayos para sistemas trifásicos.

Valor Nominal del pararrayo	Sistema no aterrizado	Sistema aterrizado
3	2,40	4,16
6	4,80	7,20
9	7,20	12,50
12	11,50	13,80
15	13,80	18,00
30	27,60	34,50
60	57,50	69,00
108	---	138,00
180	---	230,00

Tabla de selección de Pararrayos

Tabla 3.2

* Todos los valores están expresados en Kilovoltios.

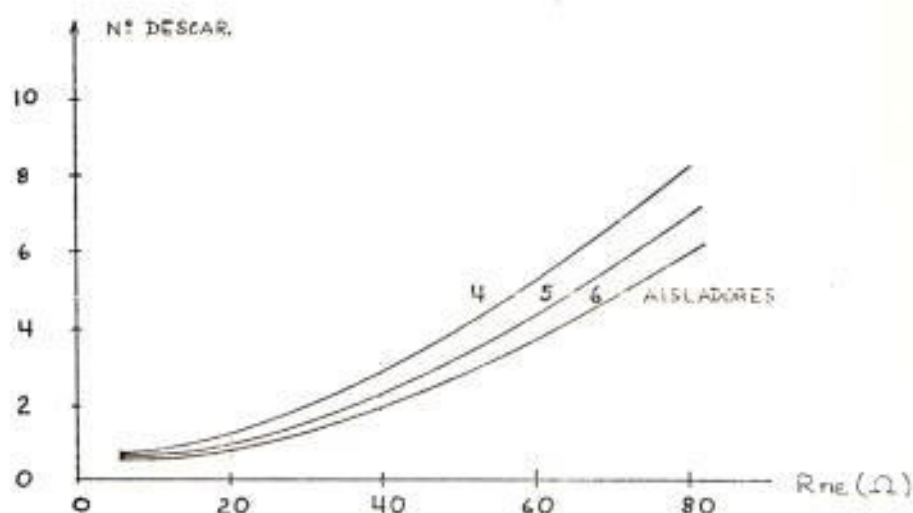
IV. DISEÑO DE LA LÍNEA.

4.1 COMPORTAMIENTO DE LINEAS TÍPICAS.

4.1.1 Introducción.

El comportamiento transiente en las líneas de alta tensión depende de cuatro factores de gran importancia: resistencia de pie de torre, aislamiento de la línea, altura media de la línea con respecto a tierra, y distancia entre torres. Los dos primeros dependen de las necesidades del sistema (niveles de voltaje, corriente, etc.); la altura media y la longitud entre torres dependen del tipo de conductor, del tipo de torre y de factores mecánicos. Sin duda los factores que más pueden variarse a fin de lograr máxima eficiencia son la resistencia de pie de torre, y el aislamiento de la línea. Existen datos normalizados que relacionan el número de descargas por kilómetro por año versus la resistencia de aterrizaje en el poste o torre. Por ejemplo, para una línea de 60 KV con separación promedio entre postes de 150 mt. y altura de

15 mts. se tiene: (se supone una nivel isoqueráunico de 30)
(1)



Variación de descargas en función de la Resistencia a tierra
Figura 4.1

1.- Las descargas atmosféricas no siempre producen descoⁿexiones en el sistema, en realidad pocas descargas dañan el aislamiento de una línea permanentemente. Con aparatos automáticos de protección, la posibilidad de evitar una salida del sistema puede llegar a superar el 90%.

Si se aumenta la separación entre torres, la probabilidad de descargas también aumenta, igual sucede si se disminuye

(1) A. Monteith, "Line Design based upon direct Strokes". (Transmission and Distribution, libro de referencia de Westinghouse).

la separación entre conductores.

2.- Para líneas en torres de acero con aisladores de porcelana la posibilidad de salida es de alrededor de 0,85.

4.1.2 Líneas en postes de madera.

Se presenta a continuación una tabla con datos sobre el comportamiento de líneas cuando se usan postes de madera:

Voltaje Nominal (KV)	Número * de aisl.	Nivel de aislami ^o **	Descargas secas 60Hz (KV)	Veces Voltaje nomin.
69	4	970	270	6,8
	5	1020	330	8,3
	6	1070	380	9,5
138	8	1330	500	6,3
	9	1380	550	6,9
	11	1490	660	8,3

* El número central es el más utilizado.

**Los valores se basan en el número de aisladores de la columna previa, adicionalmente se tiene la longitud de la madera en el circuito. Se utilizan ondas positivas de 1,5 x 40 microsegundos.

COMPORTAMIENTO DE LINEAS EN POSTES DE MADERA

Tabla 4.1

La madera puede aumentar considerablemente la capacidad del aislamiento para impulsos de voltaje; además la madera puede apagar el arco generado. Sin embargo, existe el peligro de que la corriente producida por una descarga atmosférica destruya el poste o la cruceta (corrientes menores a 10 KA pueden hacerlo) si la madera no ha sido tratada previamente.

4.1.3 Otros Factores.

a) Líneas en torres metálicas.

Se presenta a continuación una tabla similar a la anterior, donde se indica el comportamiento de las líneas cuando el poste (o torre) es de metal (o acero).

Voltaje Nominal (KV)	Número * de aisl.	Nivel de aislami.	Descargas secas 60Hz (KV)	Veces Voltaje nomin.
69	4	430	270	6,8
	6	600	380	9,5
	8	760	500	12,5
138	8	760	500	6,3
	10	930	600	7,5
	12	1100	710	8,9

* El número central es el más utilizado.

COMPORTAMIENTO DE LINEAS EN TORRES METALICAS
Tabla 4.2

b) Cables de guarda.

La selección de su calibre, ubicación y esfuerzo mecánico es muy importante. Se han presentado frecuentes problemas de contacto entre conductores de fase y el cable de tierra, originando en consecuencia una falla. Esta dificultad, se puede evitar cuando se lo escoge con características similares, a los conductores de fase. Un pequeño aumento en su diámetro mejora la protección, pero el incremento en costo es mayor por lo que no se justifica; generalmente este dinero adicional se lo usa en mejorar otros factores con resultados mucho más eficientes. La selección del cable de guarda depende más de factores mecánicos que de eléctricos.

c) Angulo de protección.

Experiencias en laboratorios y de campo muestran que el mejor valor para torres no mayores a 30 metros de altura, está alrededor de 30 grados. Sin embargo, cuando la torre se ubica sobre una pendiente, el ángulo deberá ser disminuido por el ángulo de esta pendiente. El ángulo deberá reducirse para estructuras de más de 30 metros de alto. (1).

(1) A. Monteith, "Line desing based upon direct strokes". (Transmission and distribution, libro de referencia de Westinghouse).

d) Descargas atmosféricas y Potencia de descargas.

No todas las descargas generan corrientes peligrosas. Una relación importante es el cociente entre las veces en que se genera una potencia peligrosa luego del impacto y el número de descargas.

En altos voltajes, donde el principal camino para la descarga es el aire o la porcelana (aisladores), la relación para líneas cortas, antes citada, es de 0,85. Mientras más larga es la línea, la relación se reduce, por ejemplo, en líneas de 300 km. de longitud, esta relación es de 0,50. Para líneas colocadas en postes de madera, donde parte del camino de descarga es sobre madera, la relación está entre 0,35 y 0,50 (1)

e) Resistencia de pie de torre.

La impedancia del camino de las corrientes producidas por descargas atmosféricas al entrar a la tierra es llamada impedancia de pie de torre.

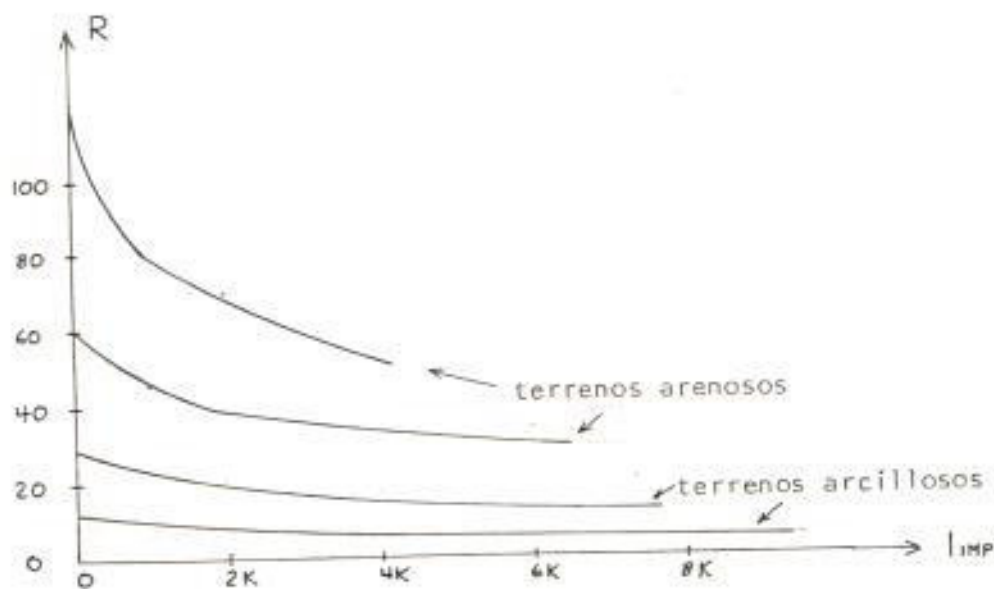
Suele expresarse tomando como base la frecuencia nominal:

(1) A. Monteith, "Line desing based upon direct Strokes". (Transmission and distribution, libro de referencia de Westinghouse).

de 60 Hz. Su valor depende de algunos parámetros como el tipo de terreno y condiciones climáticas.

En terrenos de baja o media resistividad, un mejor aterrizaje puede obtenerse usando varillas de puesta a tierra.

Interesa mucho el cambio en la resistencia de acuerdo a la corriente de impulso que se tendrá durante fallas o descargas (ver figura 4.2). Para resistencias de puesta a tierra del orden de 10 ó menos, la resistencia de impulso es apenas menor al valor de 60 ciclos; sin embargo, para altos valores de resistencia, la resistencia de impulso es considerablemente menor a la de 60 Hz.



Variación de la Resistencia de Impulso de acuerdo al suelo
Figura 4.2

Es conveniente entonces reducir la resistencia de pie de torre tanto como el factor económico lo permita. Pueden usarse las varillas, métodos químicos (más eficientes en subestaciones).

La impedancia de torre varía a lo largo de ella, esta impedancia es función del radio y de la altura de la torre, (hay fórmulas que suponen una configuración cilíndrica o cónica). Para un impacto en la torre la impedancia es la resultante entre la impedancia de torre en paralelo con la mitad de la impedancia característica del cable a tierra.

El potencial en la parte superior de la torre es modificado por reflexiones provenientes de la base de la torre y eventualmente por reflexiones desde torres adyacentes. Cuando el impacto se produce en un cable de guarda se induce un voltaje de igual polaridad en las fases; el voltaje que "siente" la torre es la diferencia entre el potencial en su parte superior y el voltaje inducido en el conductor de fase.

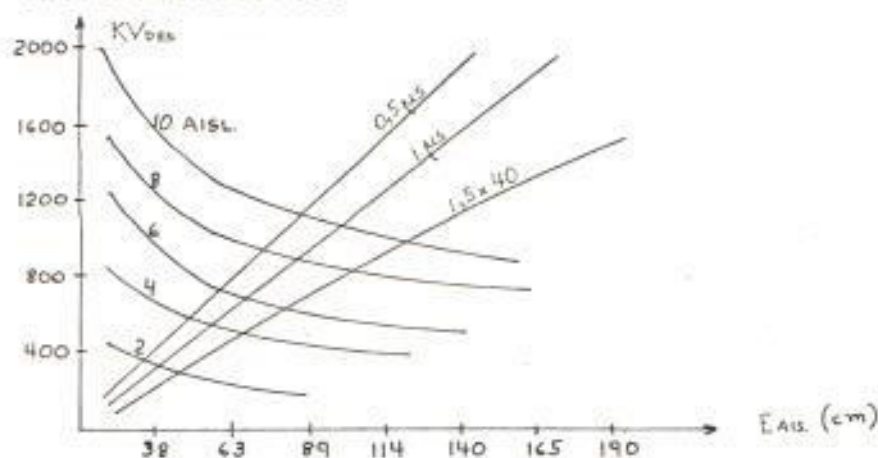
Si la resistencia de pie de tierra es mucho menor que la impedancia de torre -esto es lógico en un buen diseño- la onda que viaja hacia la base de la torre es reflejada con signo opuesto, llega luego de fracciones de microsegundo a la parte superior de la torre y el efecto neto es la reducción de la rata de crecimiento de potencial evitando que la onda

de voltaje no llegue a su pico. A mayor frente de onda con relación al tiempo de retorno, mayor es la reducción en magnitud de voltaje causada por la resistencia de pie de torre. Un efecto similar al de la resistencia de pie de torre, producen las torres vecinas.

f) Tamaño y distancia entre aisladores.

Para igual número de aisladores, a menor separación entre ellos, resultará en un impulso de descarga más alto; así mismo, a mayor diámetro del aislador la magnitud de impulso será mayor. Obviamente aumentar el diámetro y reducir el espacio entre aisladores elevan los costos, debiendo llegarse a un compromiso entre costo y resultados. El uso de madera también aumenta la magnitud del impulso.

Obsérvese cómo varía el voltaje de descarga al variar la separación entre aisladores.



Variación del Voltaje de Descarga según la separación entre aisladores

Figura 4.3

4.2 COMPORTAMIENTO DE LOS EQUIPOS BAJO SOBREVOLTAJES.

Es importante conocer cómo se comportan los transformadores y los motores ante variaciones bruscas de voltaje y presencia de sobrevoltajes en el sistema.

4.2.1 Transformadores.

Si un pararrayos protegerá o no a un transformador depende de la velocidad de crecimiento del voltaje, método de aterrizaje y la separación entre el pararrayos y el transformador. En algunos casos puede presentarse la necesidad de hacer instalar un segundo juego de pararrayos y/o capacitores

En subestaciones de bajo voltaje, pequeñas o no efectivamente protegidas, los pararrayos deben instalarse muy cerca de los transformadores; si hay varios circuitos el peligro se reduce, ya que el sobrevoltaje se divide inversamente a las impedancias de los circuitos.

El mayor objetivo en la protección de un transformador, es suprimir las oscilaciones internas, y controlar la acción de la onda incidente y del voltaje transiente originado.

El pico de voltaje y la longitud de la onda incidente son controlados por el pararrayos, el frente de onda puede ser retardado por un capacitor en paralelo o con una inductancia en serie.

Considérese el caso de un transformador de dos devanados monofásico:

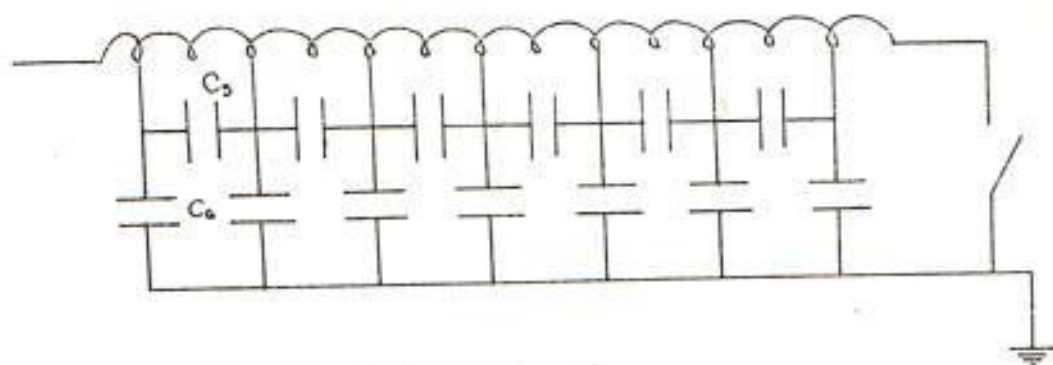
Las bobinas y vueltas de las secciones terminales de un transformador, tienen aislamiento adicional a fin de ayudar a igualar la distribución electrostática en el instante de impacto de una onda viajera. Cada vuelta tiene una capacitancia con respecto a las otras vueltas, con respecto al núcleo y con respecto al tanque. El efecto inductivo de los devanados está formado por tres partes: interconexiones debidas al flujo de su propia corriente, interconexiones parciales debidas al flujo no común a todas las vueltas, y aquellas debidas a los otros devanados. La situación que se presenta no es simple porque durante el transiente la corriente no es igual en las diferentes partes del devanado ni en magnitud, ni en signo, y cambia continuamente. Además existen resistencias en serie y fuga entre los devanados y tierra; estos factores sin embargo, suelen despreciarse ya que su influencia es pequeña en las oscilaciones, producen pequeñas distorsiones en la distribución de la onda, pequeños cambios en la frecuencia de oscilación y pequeñas reducciones en las amplitudes de oscilación.

En el momento inicial, son las capacitancias las que determinan la distribución de la onda, puesto que se comportan

como corto circuito para las corrientes. Las características en el momento final dependerán del tipo de pérdidas del transformador; en un circuito sin pérdidas los ejes de oscilación son determinados por los campos electrostático y electromagnético necesario para establecer los voltajes terminales de los devanados. La situación no depende del tiempo, las armónicas de voltaje están distribuidas como función de seno (o coseno), y las armónicas de corriente como función de coseno (o seno).

Los transformadores, son los equipos más expuestos a sobrevoltajes, en especial los debidos a descargas atmosféricas. Luego del impacto, es útil y práctico dividir el tiempo en tres partes: uno que es extremadamente corto (menos de 1 microsegundo), durante el cual no se produce corrientes de consideración que puedan penetrar el devanado debido a su inductancia, las corrientes entonces circulan en la capacitancia del devanado, originando un voltaje de distribución inicial. Durante el segundo período el voltaje sufre alteraciones hasta llegar al estado final (tercer período). En el último tiempo se asume que el voltaje de distribución en el devanado ha llegado al estado estable.

Considérese el siguiente devanado de transformador:



C_g : capacitancia del devanado a tierra.

C_s : capacitancia entre vueltas.

REPRESENTACION DEL DEVANADO DE UN TRANSFORMADOR

Figura 4.4

Cada vuelta tiene una capacitancia a tierra (C_g) y una mutua con la vuelta vecina (C_s).

Cuando: $X = 0$ $E = 0$ (neutro aterrizado)

$$X = L \quad E = V$$

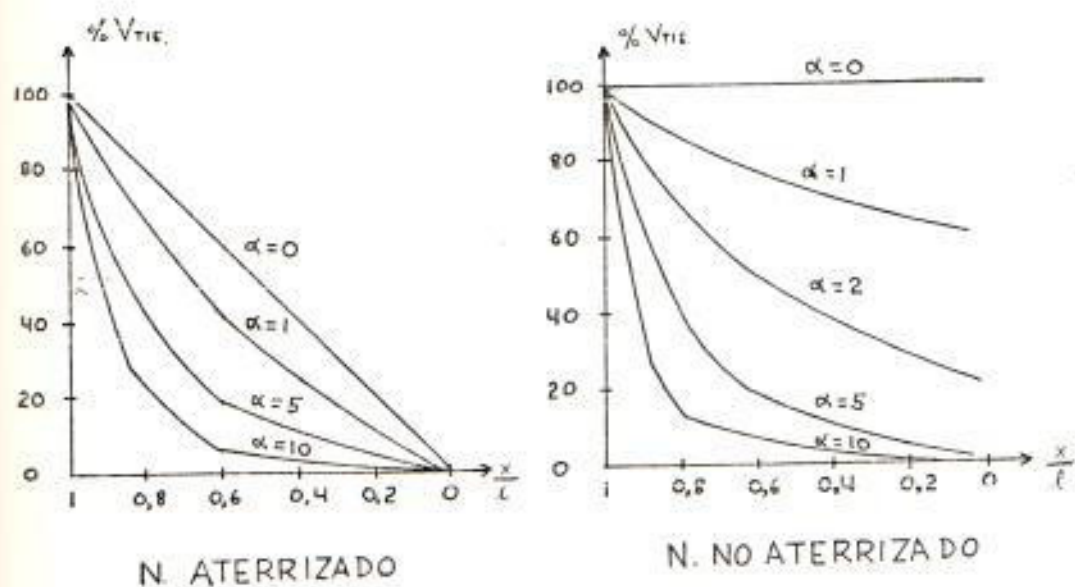
Los valores de C_g y C_s están en los siguientes rangos:

$$C_s = 10^{-5} \text{ y } 10^{-4} \text{ F.}$$

$$C_g = 10^{-3} \text{ y } 10^{-2} \text{ F.} \quad (2)$$

(2) A. Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems"

En la siguiente figura puede observarse la distribución de voltaje inicial en un devanado uniforme en respuesta a una onda escalón, para neutro aterrizado y no aterrizado:

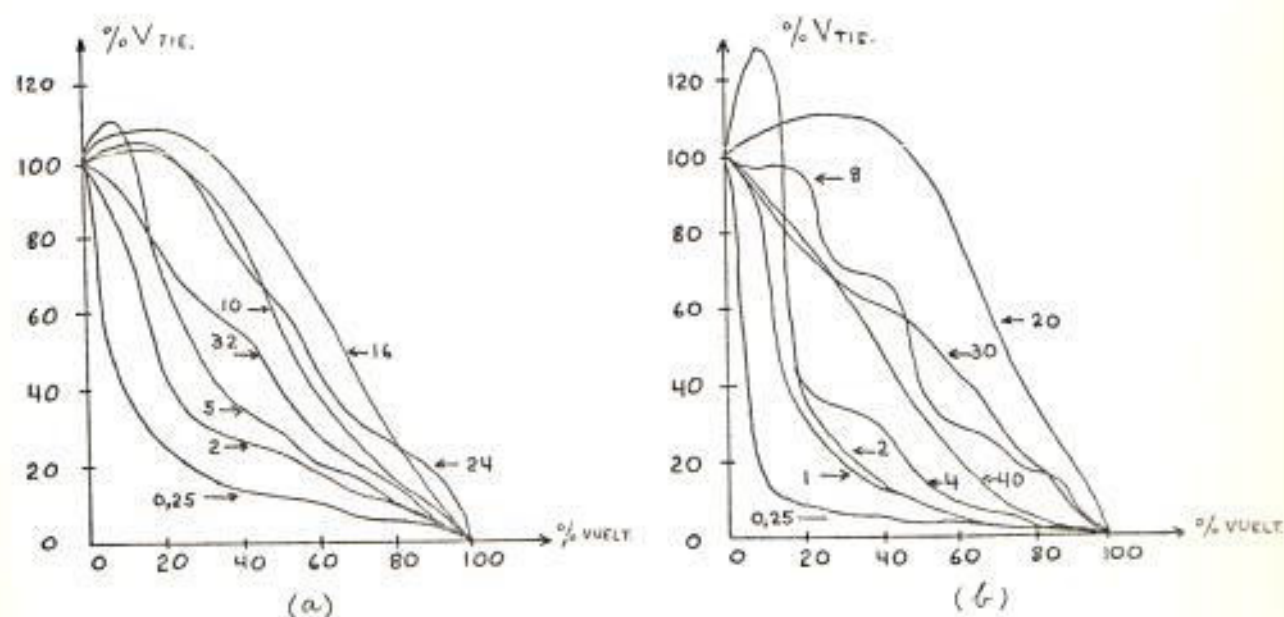


DISTRIBUCION INICIAL DE VOLTAJE EN UN DEVANADO UNIFORME
(NEUTRO ATERRIZADO Y NO ATERRIZADO)

Figura 4.5

Los valores de la capacitancia del devanado dependen estrictamente de la disposición física de las vueltas y devanados con relación a los otros y a las partes que están aterrizadas en la estructura.

El problema transiente parece tener solución al mejorar el aislamiento en las primeras vueltas, pero esto afecta el valor de la capacitancia y produce una peor situación pues la distribución de voltaje sería menos uniforme. Un método efectivo es colocar placas metálicas en posiciones estratégica junto a las bobinas, estas placas tratan de compensar la no uniformidad de la corriente (disminuye progresivamente, al perderse por fuga a través de las capacitancias a tierra).



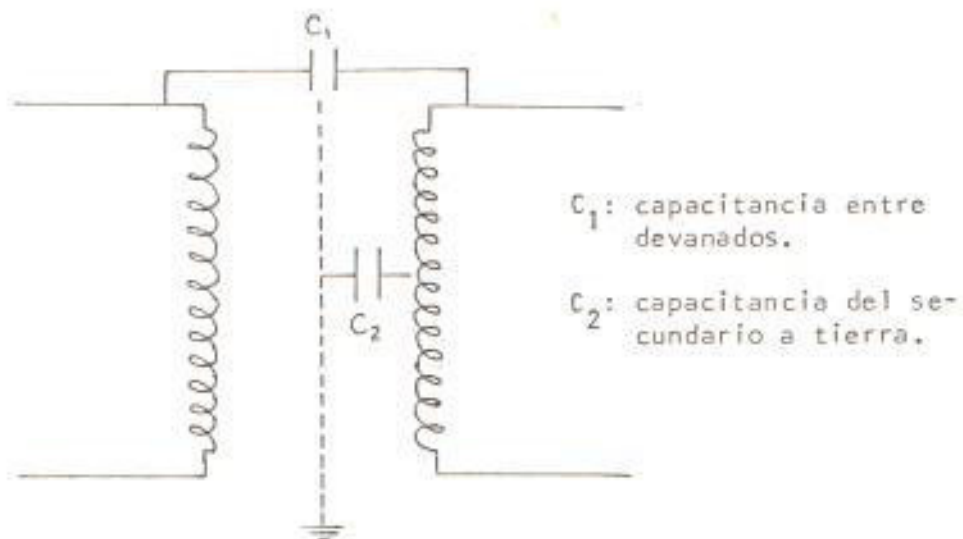
DISTRIBUCION DEL SOBREVOLTAJE TRANSIENTE EN EL DEVANADO DE UN TRANSFORMADOR. (VUELTAS INICIALES PROTEGIDAS (a) Y NO PROTEGIDAS (b))

Figura 4.6

El núcleo del transformador presenta una particularidad: a medida que el tiempo pasa deja de comportarse como una superficie equipotencial, el flujo magnético penetra las láminas, la inductancia aumenta considerablemente, pero una vez que el núcleo se satura, la inductancia disminuye. El núcleo influye en muy corto tiempo sobre la conducta transiente del devanado.

El sobrevoltaje al secundario del transformador se transmite de dos maneras: electrostática y electromagnéticamente.

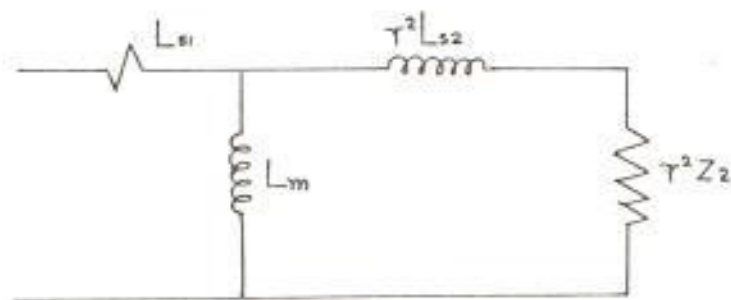
La respuesta inicial al sobrevoltaje es electrostática: el voltaje se divide inversamente a la capacitancia (figura 4.7). Este voltaje en el secundario $C_1 V / (C_1 + C_2)$ no depende del número de vueltas del transformador, y es de corta duración. El problema puede resolverse de dos formas: aumentando el valor de C_2 (conectando capacitores desde el devanado secundario a tierra), o insertando una protección a tierra entre los devanados para esconder un devanado del otro (eliminando la capacitancia entre devanados.). Ambos sistemas se usan.



Representación capacitiva de los devanados de un Transformador

Figura 4.7

El circuito de un transformador puede representarse así:



L_{s1} : inductancia del primario.

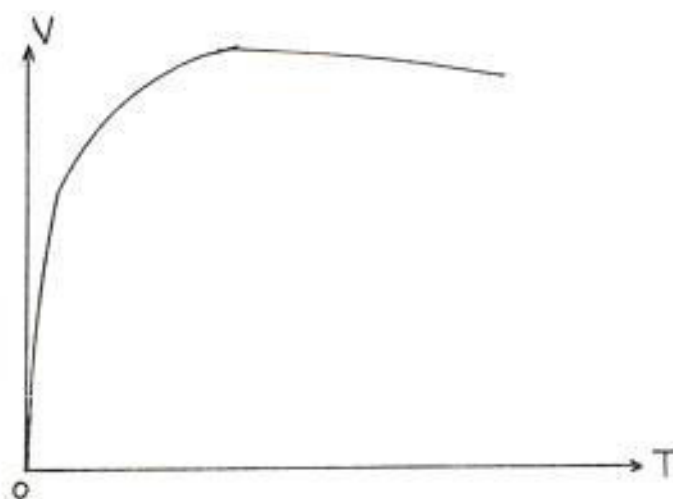
L_{s2} : inductancia del secundario.

L_m : inductancia magnetizante.

REPRESENTACION DEL CIRCUITO DEL TRANSFORMADOR

Figura 4.8

Cuando el sobrevoltaje llega al transformador, se puede despreciar L_m , ya que la corriente aumentará lentamente (L_m es muy alta). La corriente circulará por L_s pero no cambiará instantáneamente (es una inductancia). El voltaje de salida se incrementa con la corriente, y luego el voltaje disminuye exponencialmente.



REPRESENTACION DEL VOLTAJE TRANSMITIDO AL SECUNDARIO
DE UN TRANSFORMADOR
Figura 4.9

El sobrevoltaje electrostático es causante de altos sobrevoltajes, y el electromagnético tiene más que ver con la energía.

Las pérdidas normales de un transformador son insuficientes para lograr mucha influencia más allá de una disminución

del 20% en la magnitud de las oscilaciones. Sin embargo, es las pérdidas limitan los voltajes acumulados que pueden obtenerse por resonancia entre la oscilación natural y las frecuencias de la onda incidente. Aumentando suficientemente las pérdidas sería posible evitar las oscilaciones y peligro los voltajes podrían ser eliminados.

Si el circuito sólo tiene auto inductancia distribuida y capacitancia a tierra, el transiente es una simple onda vijaera que avanza y regresa entre la línea terminal y el neutro a una rata uniforme. La presencia de capacitancias en serie o inductancia mutua entre partes de un devanado introduce distorsión, siendo la última la más influyente. En general:

1.- Las capacitancias en serie tienden a disminuir las amplitudes de oscilación, disminuir las frecuencias de oscilación, en especial las de altas armónicas, tienden también a disminuir la velocidad de las armónicas, a aumentar la impedancia característica de las armónicas y a mejorar la distribución inicial.

2.- La inductancia mutua tiende a aumentar las frecuencias de oscialción, aumentar las velocidades de las armónicas, y

disminuir las impedancias características. No tiene efecto en la distribución inicial ni en las amplitudes de oscilación; la distribución inicial en el final de la línea indica el máximo gradiente que ocurrirá en el devanado.

Las oscilaciones transientes internas causadas por el impacto de una onda viajera son responsables de dos efectos importantes:

1.- El conjunto de oscilaciones excede el nivel de equilibrio correspondiente a las condiciones de estado estable. Para un transformador con neutro aterrizado, el voltaje interno puede exceder el voltaje de línea por más del 40%; si es con neutro aislado, puede excederlo en más del 125%; y hasta pueden doblarse estos valores si la onda aplicada es oscilatoria y cerca de resonancia con la frecuencia natural del transformador.

2.- Los gradientes de voltaje en el devanado son de 10 a 30 veces o más, el gradiente normal correspondiente a una distribución uniforme de voltaje (2).

Es obvio que grandes ventajas se obtendrán si las oscilacio

(2) A. Greenwood, "Electrical transients in Power Systems".

nes armónicas se suprimen.

Como referencia, se indican a continuación ciertos detalles importantes y prácticos sobre los parámetros del transformador:

1.- Inductancia.

Su valor depende del diseño, o mejor, de la disposición de sus devanados: a mayor separación entre devanados o del núcleo con los devanados, mayor es el valor de la inductancia; éste puede ser el caso de transformadores de alto voltaje, donde es necesario mayor aislamiento en los devanados.

La inductancia magnetizante del transformador, es mayor que la autoinductancia. Su valor depende de la cantidad de hierro utilizada por el fabricante, siendo mayor a niveles de voltaje superiores.

La inductancia magnetizante no es constante, ya que la relación entre el flujo y la corriente no es lineal; bajo condiciones de estado estable puede introducir armónicas en las formas de onda de corriente y voltaje.

2.- Capacitancia.

Su valor depende del área de los devanados, la separación y

la permitividad del material entre los mismos.

A mayor capacidad del transformador, mayor es su capacitancia; los transformadores de más altos voltajes tienen menores valores de capacitancia pues la separación entre devanados y devanados y núcleo es mayor.

El tipo de devanado puede afectar bastante el valor de la capacitancia.

3.- Resistencia.

Su valor es muy bajo, del orden de 0,2 al 1,5%.

La relación X/R está entre 10 y 30, siendo menor para los transformadores de distribución o pequeños.

4.2.2 Motores.

Los generadores y motores están menos expuestos a posibles sobrevoltajes ya que rara vez están conectados directamente a líneas aéreas, que es donde las descargas atmosféricas pueden incidir; sin embargo, los motores pueden sufrir por sobrevoltajes de maniobra.

Hay diferencias entre estas máquinas y los transformadores; como por ejemplo: el número de vueltas es menor, pero son más largas y están profundamente enterradas en el acero del estator; la capacitancia entre el devanado y el hierro del núcleo aterrizado que está alrededor es muy alta, la capacitancia serie en cambio es sólo importante donde los conductores ocupan la misma ranura.

Un sobrevoltaje en los terminales de la máquina eleva el voltaje en la vuelta terminal (última vuelta) pero las vueltas más interiores son forzadas (por el efecto capacitivo con tierra) y demoran su respuesta a la onda de sobrevoltaje. El resultado es un elevado gradiente de voltaje que aparece como un severo voltaje en el aislamiento entre las vueltas terminales de la bobina. La protección del aislamiento de las vueltas es importante en motores.

Las recomendaciones exigen:

- 1.- Estricta y efectiva protección.
- 2.- Pararrayos en los terminales de la máquina.
- 3.- Capacitores en los terminales de la máquina.
- 4.- Practicar adecuados métodos de aterrizamiento. (3)

(3) George Waish, "A review of lightning protection and grounding practices."

Recuérdese que las máquinas rotativas resisten poco sobrevoltaje de impulso, el aislamiento entre vueltas puede ser dañado; como referencia puede considerarse que si el sobrevoltaje no es mayor en 30% al voltaje pico de la prueba de 1 minuto - 60 Hz, o si se supera este valor en más de 5 microsegundos, es poco probable que la máquina sea seriamente afectada.

El gradiente de voltaje en una máquina rotativa depende de la pendiente de la onda incidente (a mayor inclinación del frente de onda, menor uniformidad en la distribución del voltaje en los devanados). Para reducir esta inclinación se usan capacitores, pero no son muy efectivos en ondas largas y es entonces conveniente colocar también un pararrayos.

El aislamiento del equipo puede soportar altos sobrevoltajes si éstos son aplicados por corto tiempo; igual sucede con los equipos de protección, los mismos que necesitan del flujo inicial de los electrones para que se produzca la ruptura del dieléctrico. Este tiempo depende de las condiciones atmosféricas y del nivel de voltaje incidente.

4.3 DISEÑO OPTIMO DE PROTECCION EN UN SISTEMA DE POTENCIA INDUSTRIAL.

Se deben considerar algunos factores:

- 1.- Los máximos voltajes que pueden ocurrir con y sin protección.
 - 2.- El margen entre el voltaje máximo que puede ocurrir y el nivel máximo permitido por el equipo de protección.
 - 3.- El probable número de salidas como consecuencia de los sobrevoltajes.
- También hay que tener en cuenta la "zona vulnerable", que es la distancia desde la subestación y hasta un punto donde los sobrevoltajes pueden originar problemas. La longitud de esta zona es función de la atenuación, distorsión, y del coeficiente de refracción.

Una buena protección se logra utilizando pararrayos, cables de guarda un kilómetro alrededor de la estación, adecuado a pantallamiento usando mástiles o cables de tierra, tierras de baja resistencia. En muchos casos, la capacitancia de ciertos equipos, que ayudan a reducir el pico del sobrevoltaje, producen excelentes efectos de protección.

Las subestaciones tienen transformadores y otros equipos de

valor cuyo aislamiento se deteriora cuando sufre impactos o originados por altos sobrevoltajes, por lo que es importante evitar las descargas internas y reducir a un mínimo las descargas externas. El nivel de protección contra sobrevoltajes debe ser inferior al BIL de todos los equipos, y con un margen adecuado de seguridad.

Los hilos de guarda deben tener 4 características esencia-les:

- 1.- Deben estar instalados sobre los conductores de línea a fin de interceptar los impactos directos, (ésto es llamado apantallamiento).
- 2.- Debe existir una adecuada separación con los conductores de línea para evitar descargas entre ellos originadas por posibles sobrevoltajes.
- 3.- La resistencia a tierra debe ser baja, así también el efecto mutuo entre los cables de línea y tierra con el propósito de impedir descargas a través de los aisladores.
- 4.- Deben ser de longitud adecuada para proteger la subestación.

Los hilos de guarda también originan efectos secundarios:

- 1.- Pueden ocurrir voltajes inducidos.
- 2.- Pueden producir interferencia telefónica o de radio.

3.- Reducen la impedancia característica de la línea.

Esta reducción de la impedancia permite que el sobrevoltaje inicial sea menor.

El acoplamiento eléctrico y magnético entre los cables de guarda y la línea del sistema es considerable, lo cual tiende a limitar el sobrevoltaje que puede establecerse entre ellos y reduce por consiguiente la posibilidad de descarga.

El factor de reducción del sobrevoltaje es $(1-k)$, siendo k el acoplamiento entre los cables de guarda y de fase.

En condiciones de estado estable, la seguridad y protección se logra en base a un adecuado aislamiento y suficiente separación entre el personal y los conductores de alto voltaje. El objeto de la protección es reducir los gradientes de potencial transientes lo más que se pueda. La efectividad de enterrar varillas depende de la resistividad del terreno, ésta es menor con la humedad y en especial si el terreno es rico en minerales. Cuando el terreno es muy seco, la sal es un buen elemento para disminuir la resistividad. Es importante que todos los objetos tengan la misma tierra, pues así se evita que puedan aparecer diferencias apreciables de potencial.

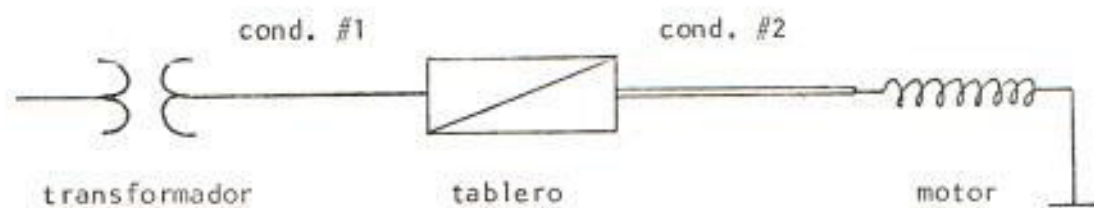
Los sistemas de control deben también ser protegidos; esta necesidad ha tenido mayor importancia debido a que los equipos se están "transistorizando", y se vuelven más sensibles a los sobrevoltajes, además equipos adyacentes pueden inducir altos voltajes; resulta importante en su protección minimizar el acoplamiento con estos circuitos usando un apantallamiento efectivo.

El óptimo diseño trata de mantener las incidencias de los impactos en el sistema en un mínimo, y reducir los efectos de estos impactos. Es imposible eliminar todos los problemas originados por las descargas atmosféricas, ésto sería realizable si las líneas se instalaran en túneles a 6 metros bajo el nivel de la tierra, lo que resultaría sumamente costoso y nada justificable: DEBE LLEGARSE A UN COMPROMISO ENTRE SEGURIDAD Y ECONOMIA.

V. APLICACION A EJEMPLOS PRACTICOS.

5.1 PARAMETROS TÍPICOS EN UN SISTEMA DE POTENCIA INDUSTRIAL.

El circuito que se analiza en el programa de computadora es el siguiente:



CIRCUITO DEL PROGRAMA ELABORADO

Figura 5.1

En consecuencia, a continuación se presentan tablas con valores típicos de parámetros relacionados con el circuito presentado.

1.- Transformadores.

KVA	Pérdidas en vacío	Pérdidas totales a 75°C	Rendimientos 75°C			% de impedancia a 75°C	
			Plena carga	3/4	1/2		1/4
2,5	44	113	95,7	95,8	95,3	92,8	3,1
5	58	180	96,5	96,8	96,6	95,0	2,9
10	92	288	97,2	97,4	97,2	96,0	2,8
15	122	396	97,4	97,6	97,5	96,4	3,0
25	170	550	97,9	98,0	97,9	97,0	3,3
37,5	230	748	98,1	98,2	98,1	97,3	3,3
50	300	958	98,1	98,3	98,2	97,4	3,2
75	415	1375	98,2	98,3	98,3	97,5	5,0
100	530	1755	98,3	98,4	98,3	97,6	5,1
150	750	2520	98,3	98,5	98,4	97,8	5,0
200	950	3240	98,4	98,5	98,5	97,9	5,0
250	1115	3815	98,5	98,6	98,6	98,0	5,0
333	1310	4665	98,6	98,7	98,7	98,2	5,0
500	1675	6325	98,8	98,9	98,9	98,5	5,0

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION MONOFASICOS EN BAÑO DE ACEITE A 60 HZ. (Tensión normal de 13.200 V en el lado de Alta Tensión)

Tabla 5.1

KVA	Pérdidas en vacío	Pérdidas totales a 75°C	Rendimientos 75°C			% de impedancia a 75°C	
			Plena carga	3/4	1/2		1/4
50	640	1515	97,1	97,1	96,7	94,7	6,5
75	820	1950	97,5	97,5	97,1	95,5	6,5
100	970	2385	97,7	97,7	97,4	95,9	6,5
150	1220	3160	97,9	98,0	97,8	96,5	6,5
200	1440	3900	98,1	98,1	98,0	96,9	6,5
250	1630	4615	98,2	98,3	98,1	97,2	6,5
333	1875	5635	98,3	98,4	98,3	97,5	6,5
500	2400	7380	98,5	98,6	98,6	97,9	6,5

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION MONOFASICOS EN BAÑO DE ACEITE A 60 HZ (Tensión normal de 66.000 V en el lado de Alta Tensión)

Tabla 5.2

KVA	Pérdidas en vacío	Pérdidas totales a 75°C	Rendimientos 75°C			% de impedancia a 75°C	
			Plena carga	3/4	1/2		1/4
15	165	565	96,4	96,7	96,6	95,2	4,8
25	230	800	96,9	97,2	97,1	96,0	3,6
37,5	305	1065	97,3	97,5	97,4	96,4	4,5
50	375	1305	97,5	97,7	97,6	96,6	4,5
75	515	1785	97,7	97,9	97,8	96,9	3,5
100	630	2190	97,9	98,0	82,0	97,2	5,5
150	790	2920	98,1	98,3	98,2	97,6	4,5
200	930	3580	98,3	98,4	98,4	97,8	4,5
300	1225	4795	98,4	98,6	98,6	98,1	5,0
450	1650	6690	98,5	98,7	98,7	98,3	5,0

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION TRIFASICOS EN BAÑO DE ACEITE A 60 HZ.
(Tensión normal de 13.200 V en el lado de Alta Tensión)

Tabla 5.3

KVA	Pérdidas en vacío	Pérdidas totales a 75°C	Rendimientos 75°C			% de impedancia a 75°C	
			Plena carga	3/4	1/2		1/4
150	1450	3970	97,4	97,5	97,3	95,9	6,5
200	1700	4800	97,7	97,8	97,6	96,4	6,5
300	2200	6340	97,9	98,0	97,9	96,8	6,5
450	2850	8420	98,2	98,3	98,1	97,2	6,5

CARACTERISTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION TRIFASICOS EN BAÑO DE ACEITE A 60 HZ.
(Tensión normal de 66.000 V en el lado de Alta Tensión)

Tabla 5.4

Las impedancias características usadas en los problemas sobre descargas atmosféricas son diferentes de las impedancias a frecuencia nominal, ya que diferentes frecuencias están involucradas. A continuación se presenta una tabla de impedancias características para problemas de sobrevoltaje para transformadores:

KVA	Impedancia característica (ohmios)
20	9.000
30	6.500
40	5.500
50	5.300
60	5.050
70	4.900
80	4.700
90	4.500
100	4.200
200	3.000
300	2.700
400	2.400
500	2.250
1.000	1.950
5.000	1.150

IMPEDANCIA CARACTERISTICA POR FASE

Tabla 5.5

2.- Conductores.

A continuación se presentan tablas sobre impedancia característica para diferentes tipos de conductores. Datos adicionales se pueden encontrar al final del Capítulo Primero.

AWG-MCM	Imped. Carac. (Ω)	
	15 KV	35 KV
1/0	23	34
2/0	21	32
4/0	17	26
250	15	25
350	13	22
500	10	18

IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE
CONDUCTORES SENCILLOS AISLADOS

Tabla 5.6

La impedancia característica de los conductores aumenta con la altura sobre la tierra; la Tabla 5.7 presenta algunos valores de impedancia característica en función de la altura.

Altura (pies)	Impedanc. Caracter. (Ω)			
	#6	2/0	500	1.000
20	515	460	420	400
30	540	485	440	425
40	560	505	460	440
50	575	520	475	455
60	585	530	485	465
70	595	540	495	475
80	605	550	505	485
90	610	555	510	490

IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE
CONDUCTORES AEREOS DESNUDOS

Tabla 5.7

3.- Motores.

La Tabla 5.8 presenta valores típicos de impedancia característica en motores.

La Tabla 5.9 presenta valores típicos de máquinas sincrónicas trifásicas, donde las reactancias están dadas en valores por unidad y las constantes de tiempo en segundos. Los valores bajo la línea dan el rango normal de valores, mientras que los que están encima indican un valor promedio.

MVA/ KV	Impedancia Característica (Ω)		
	Gen. turb. 2 polos	Máq. polos sal. 4 polos	Máq. polos sal. 6 polos
1	---	450	320
2	500	280	190
3	360	190	140
4	300	160	105
5	250	140	90
6	205	120	80
7	190	100	70
8	180	90	60
9	170	80	56
10	160	75	52
20	80	44	30

IMPEDANCIA CARACTERISTICA TIPICA
DE MAQUINAS SINCRONICAS

Tabla 5.8

	X_d (no sat)	X_q	X_d'	X_d''	X_2	X_0	R_2	R_1	R_a	T_{co}	$T_{d'}$	$T_{d''}$
Generador de turbina de 2 polos	$\frac{1,20}{,95-},45$	$\frac{1,16}{,92-1,42}$	$\frac{0,15}{,12-},21$	$\frac{0,09}{,07-},14$	$=X_d''$	$\frac{0,03}{,01-},08$	$,025- ,04$	$,004- ,011$	$,001- ,007$	$\frac{5,0}{1,6-10}$	$\frac{0,6}{,18-1,25}$	$\frac{0,035}{,02-},05$
Generador de turbina de 4 polos	$\frac{1,20}{1,0-},45$	$\frac{1,16}{,92-1,42}$	$\frac{0,23}{,20-},28$	$\frac{0,14}{,12-},17$	$=X_d''$	$\frac{0,08}{,01-},14$	$,03- ,045$	$,003- ,008$	$,001- ,005$	$\frac{8,0}{1,6-10}$	$\frac{1,0}{,18-1,25}$	$\frac{0,035}{,02-},05$
Generador y motor de polos salie.	$\frac{1,25}{,60-1,50}$	$\frac{0,70}{,40-0,80}$	$\frac{0,30^*}{,20-},50$	$\frac{0,20^*}{,13-},32$	$\frac{0,20}{,13-},32$	$\frac{0,18}{,03-},23$	$,012- ,02$	$,005- ,020$	$,003- ,015$	$\frac{4,0}{1,5-10}$	$\frac{1,5}{,50-3,30}$	$\frac{0,035}{,01-},05$

* : Unidades de alta velocidad tienden a tener baja reactancia, mientras que las de baja velocidad, a los valores de reactancia.

VALORES TÍPICOS DE MAQUINAS SINCRONICAS TRIFASICAS

Tabla 5.9

Los rangos de la velocidad de propagación suelen ser los siguientes:

Transformadores.....	120 a 250 mt/microsegundos
Conductores aislados.....	90 a 185 mt/microsegundos
Conductores desnudos.....	300 mt/microsegundos
Máquinas sincrónicas.....	7,5 a 46 mt/microsegundos

5.2 APLICACION DEL PROGRAMA.

Considere un sistema de potencia cuyas características principales se resumen en la Tabla 5.10.

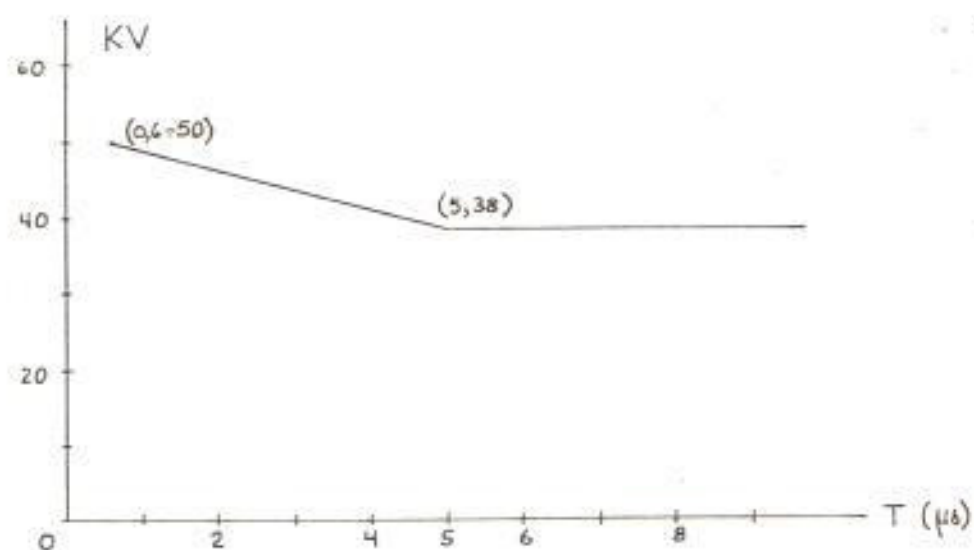
	TRANSFORMADOR	COND.#1	COND.#2	MOTOR
CARACTERISTICAS	69/13,8 KV 5 MVA	2/0 A1 15 KV	#2 15 KV	3,5 MVA 13,8 KV 4 p.sal
IMPEDANCIA CARACTERISTICA (Ohmios)	1.150	21	30	600
TIEMPO DE PROPAGACION (MICROSEGUNDOS)	-	1	1	3

CARACTERISTICAS DE LOS EQUIPOS DEL EJEMPLO
Tabla 5.10

Datos adicionales son los siguientes:

Nivel Básico de Aislamiento de los conductores de 15 KV...	75
Nivel Básico de Aislamiento de los devanados del motor....	75
Rata máxima de crecimiento de voltaje en el motor.....	75
Coefficiente de reflexión en el neutro del motor.....	-1

Las características del Pararrayos que se seleccione se pueden encontrar en el Apéndice C. Supóngase que se escoge un pararrayos tipo válvula-distribución de voltaje nominal 10 KV y cuyas propiedades se resumen en el siguiente gráfico:



Características del Pararrayos del ejemplo de aplicación

Figura 5.2

Los datos que deben ingresarse son los siguientes:

Impedancia del transformador (Z1).....	1,150
Impedancia de la Alimentadora (Z2).....	21
Impedancia del cable hacia el motor (Z3).....	30
Impedancia del motor (Z4).....	600
Tiempo de propagación en la Alimentadora (T1).....	1
Tiempo de propagación en el cable al motor (T2).....	1
Tiempo de propagación en el motor (T3).....	3
Nivel Básico de Aislamiento de la Alimentadora.....	75
Nivel Básico de Aislamiento del cable hacia el motor.....	75
Nivel Básico de Aislamiento del motor.....	75
Tiempo entre operación y descarga del Pararrayos (T4).....	4,4
Tiempo del Voltaje Máximo de Operación del Pararrayos (T5)..	0,6
Voltaje Máximo de Operación del Pararrayos (KV1).....	50
Voltaje de Descarga del Pararrayos (VLA).....	38
Voltaje incidente luego del transformador (VIN).....	25
Rata máxima de crecimiento de voltaje en el motor (KVM).....	75
Posición del Pararrayos (S).....	1
Coefficiente de reflexión en el neutro del motor (AL43).....	-1
Número de iteraciones que desea que se realicen (X4).....	30

5.3 ANALISIS DE RESULTADOS.

Se presenta un conjunto de "diagramas de lattice" elaborado variando las posiciones del pararrayos y/o capacitor en el circuito. La necesidad o no del capacitor está determinada por la rata máxima de crecimiento del voltaje en los terminales del motor (posición 3), si ésta es mayor a la máxima permitida por el motor, es necesaria la instalación de capacitores. En el ejemplo la rata máxima de crecimiento de la tensión en los terminales del motor se obtiene a los 2 microsegundos (la primera onda de sobrevoltaje que llega al motor) y es de 28,01 KV/microsegundos.

Para obtener los resultados sin la instalación de capacitores, se ingresó en el programa (ver hojas de ejecución del programa al final del capítulo) un valor para la máxima rata de crecimiento de voltaje en el motor (KVM) de 28,1.

Los resultados obtenidos para las diferentes posiciones del pararrayos en el circuito sin usar capacitor se presentan en los 3 primeros diagramas de lattice. En la parte superior de cada diagrama se ha dibujado el circuito indicando la posición del pararrayos, y si actuó (cuando se encuentre el símbolo ζ junto a él) o no.

Se repitió luego la ejecución del programa cambiando únicamente el valor de KVM a 28,0 por lo que es necesaria la ins

instalación de capacitores. Se ingresó un valor de 0,25 microfaradios, y los resultados para las combinaciones pararrayos-capacitor se presentan también en diagramas de lattice, donde las posiciones 1,2 y 3 del circuito graficado sobre cada diagrama (ver Figuras 5.3 a 5.10), corresponden a las mismas posiciones en el diagrama.

En este ejemplo puede notarse lo siguiente:

1.- Cuando el pararrayos se instala en la posición 1 y no se colocan capacitores de protección (ver Figura 5.3), los sobrevoltajes acumulados determinan la operación del pararrayos a los 4 microsegundos, cuando el sobrevoltaje es de 40,7272 KV. En estas circunstancias el sobrevoltaje en los terminales del motor llega a valores altos (63,36 KV a los 26 microsegundos).

2.- Cuando el pararrayos se instala en la posición 2 y no se colocan capacitores de protección (ver Figura 5.4), los sobrevoltajes acumulados determinan la operación del pararrayos a los 3 microsegundos, cuando el sobrevoltaje es de 43,4545 KV. En este caso, el máximo sobrevoltaje en los terminales del motor es de 56,02 KV, y que ocurre a los 2 microsegundos.

Nótese que ubicando el pararrayos en esta posición, los máxi

mos sobrevoltajes en las posiciones 1, 2 y 3 son diferentes a los obtenidos cuando el pararrayos estaba ubicado en la posición 1. El máximo sobrevoltaje en la posición 1 aumentó de 40,73 KV a 52,89 KV, mientras que en la posición 2, y debido a la actuación del pararrayos, disminuyó de 56,33 KV a 43,45 KV. En los terminales del motor el máximo sobrevoltaje se redujo de 63,36 KV a 56,02 KV.

3.- Cuando el pararrayos se instala en la posición 3 (terminales del motor), y no se colocan capacitores (ver Figura. 5.5), se produce la operación del pararrayos a los 2 microsegundos, y cuando el sobrevoltaje es de 46.1818 KV. Este es el máximo sobrevoltaje que incide sobre los terminales. Debe observarse que el máximo sobrevoltaje en la posición 1 aumentó con relación a los dos casos anteriores; con el pararrayos en esta posición se obtiene el menor sobrevoltaje, en los terminales del motor, con relación a otras posiciones del pararrayos. Una tabla con el resumen de los resultados se encuentra al final del capítulo.

A medida que se acerca el pararrayos al motor, disminuyen los sobrevoltajes en esta posición, mientras que se elevan los sobrevoltajes en las posiciones más alejadas (1 y 2). Es decir, que a pesar de la ubicación del pararrayos en los terminales, pueden producirse altos voltajes en las demás

posiciones, debido a la distancia eléctrica entre el motor y el pararrayos.

4.- Cuando se instalan el pararrayos y los capacitores en la posición 1, el pararrayos no actúa, debido a la acción reductora de la rata de crecimiento que realizan los capacitores. El máximo sobrevoltaje en esta posición es de 33,94 KV. Sin embargo, el máximo sobrevoltaje en los terminales del motor es de 56,02 KV, a los 2 microsegundos. (ver Figura 5.6). Obsérvese la diferencia entre los máximos sobrevoltajes para las diferentes posiciones cuando se instalan capacitores y pararrayos, y cuando sólo se instalan los pararrayos.

5.- Con el pararrayos instalado en la posición 2 y los capacitores en la posición 1, se produce la operación del pararrayos a los 3 microsegundos, cuando el sobrevoltaje es de 43,4545 KV. El máximo sobrevoltaje en los terminales del motor es de 56,02 KV. (ver Figura 5.7).

Debido a que el máximo sobrevoltaje en el motor es causado por la primera onda incidente, el efecto reductor de los capacitores no se observa.

6.- En la Figura 5.8 puede observarse el diagrama de Bewley, para el caso en el cual el pararrayos se instala en la posi-

ción 3 y el capacitor en la posición 1. Con estas condiciones el pararrayos opera a los 2 microsegundos, con un valor de sobrevoltaje de 46,1818 KV.

7.- Cuando los capacitores se colocan ya sea en la posición 2 o en la posición 3, los sobrevoltajes transientes originados por las reflexiones y refracciones, son insuficientes para lograr la operación del pararrayos. En estas circunstancias, los máximos sobrevoltajes que inciden en los terminales del motor son de 18,39 KV (capacitores en la posición 2) y de 9,53 (capacitores en la posición 3).

Puede notar el lector, que el menor sobrevoltaje máximo que se obtiene en los terminales del motor es cuando el pararrayos y los capacitores se instalan en la posición 3, es decir justamente en los terminales de la máquina.

A continuación de los diagramas de lattice, se encuentra la ejecución del programa de computadora elaborado, con los resultados completos para cada una de las posiciones del pararrayos y capacitores.

Nótese que en los gráficos obtenidos en el computador, cuando se grafica la posición donde está instalado el pararrayos la curva de éste también se presenta.

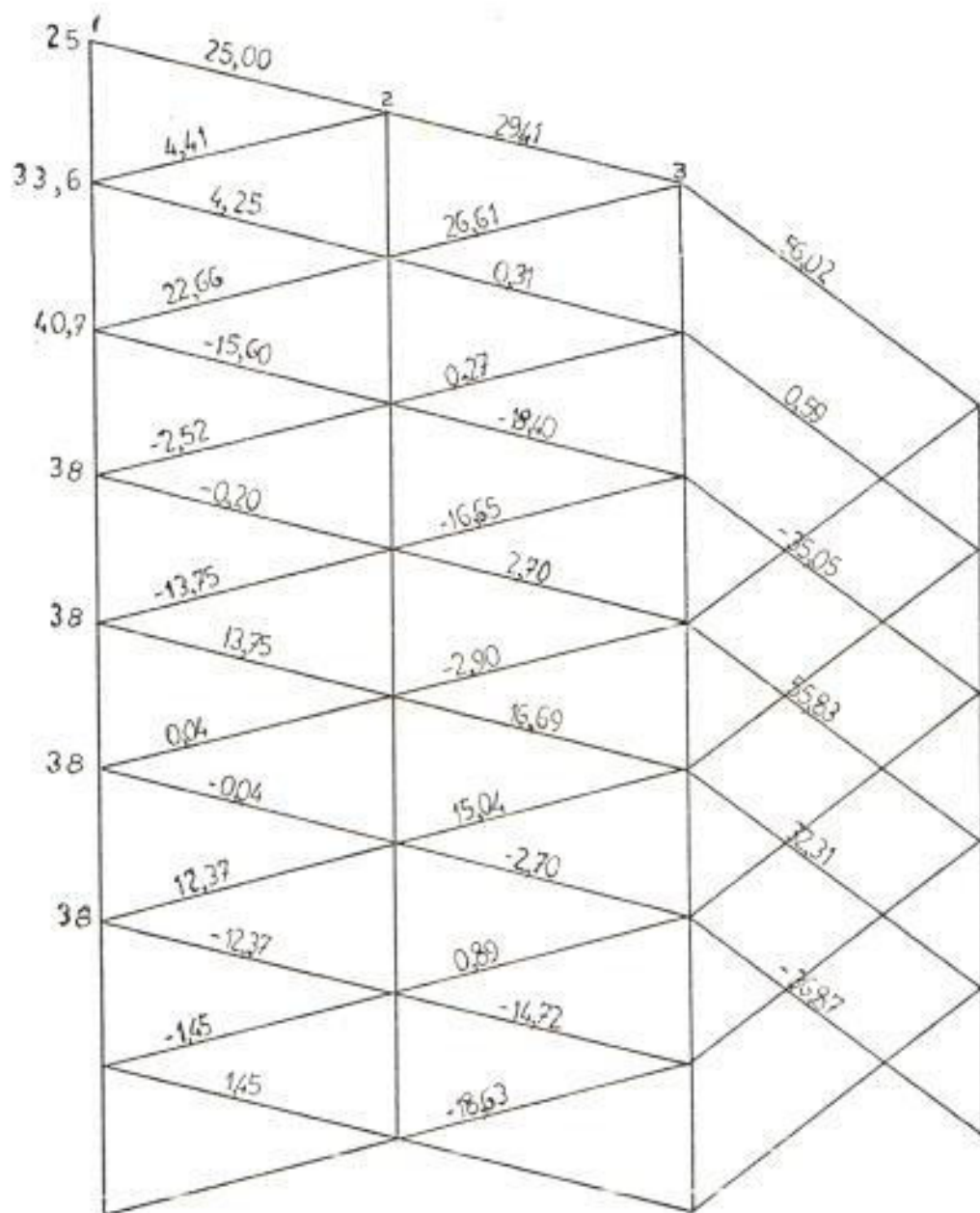


Figura 5.3
Diagrama de lattice

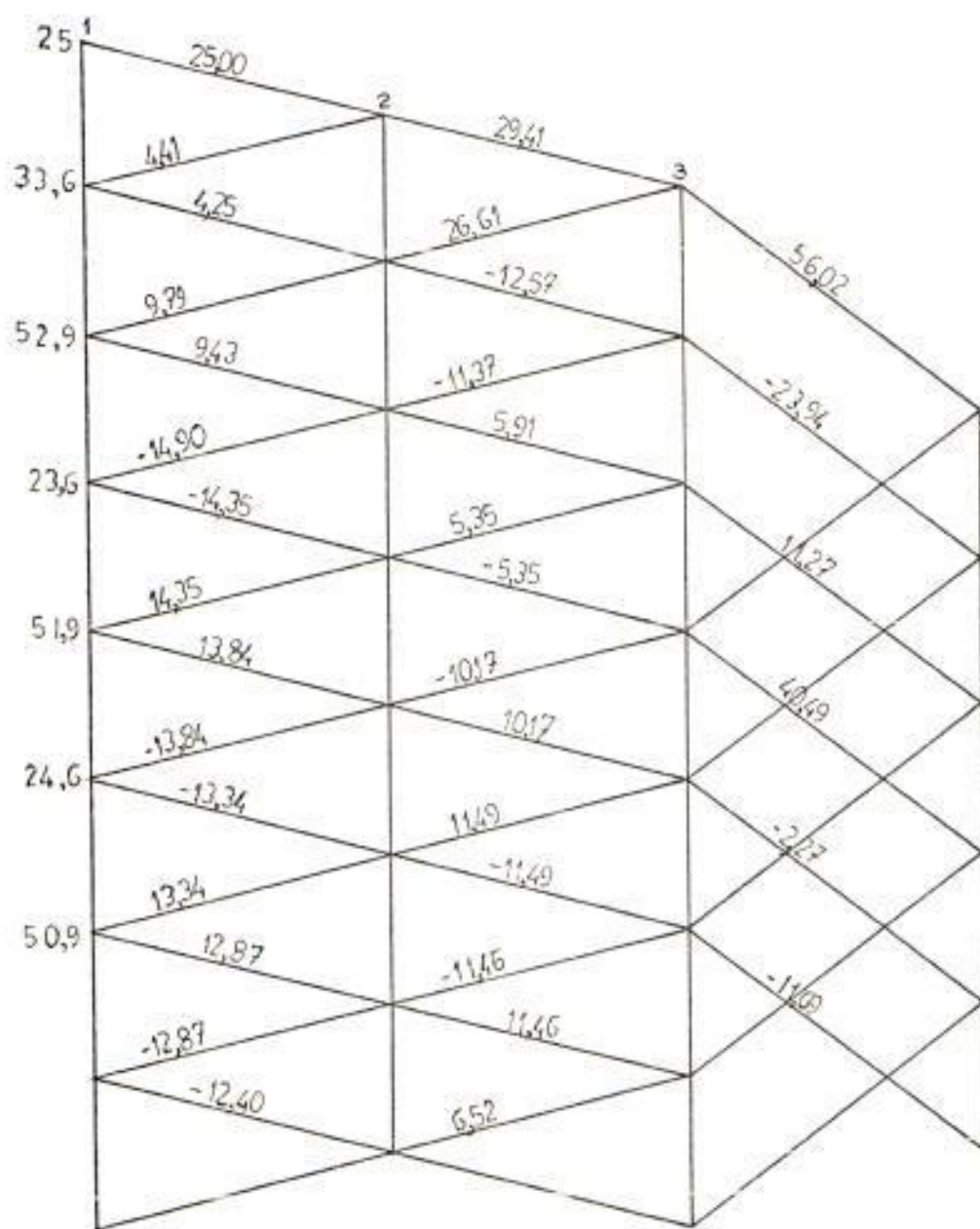


Figura 5.4
Diagrama de lattice

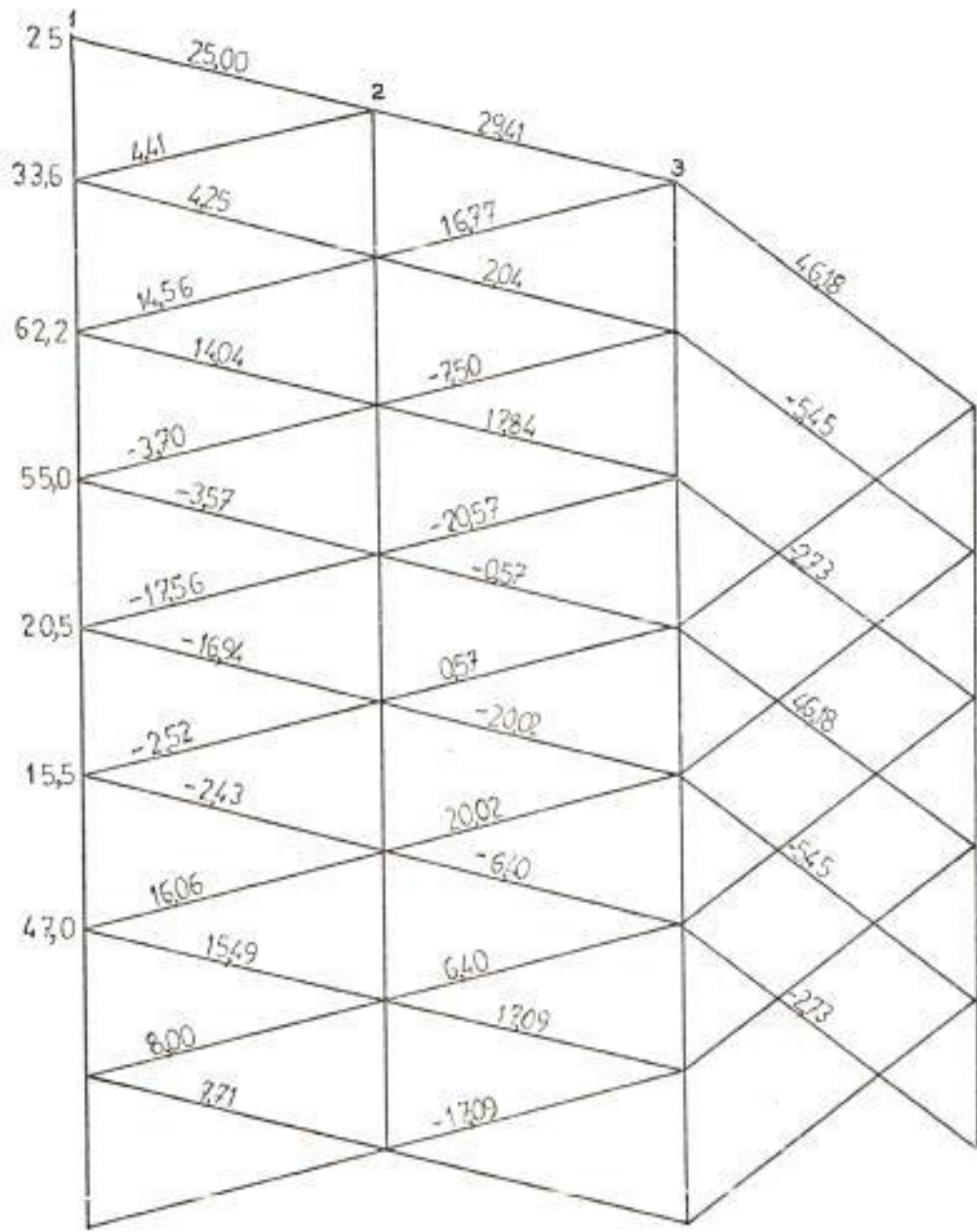


Figura 5.5
Diagrama de lattice

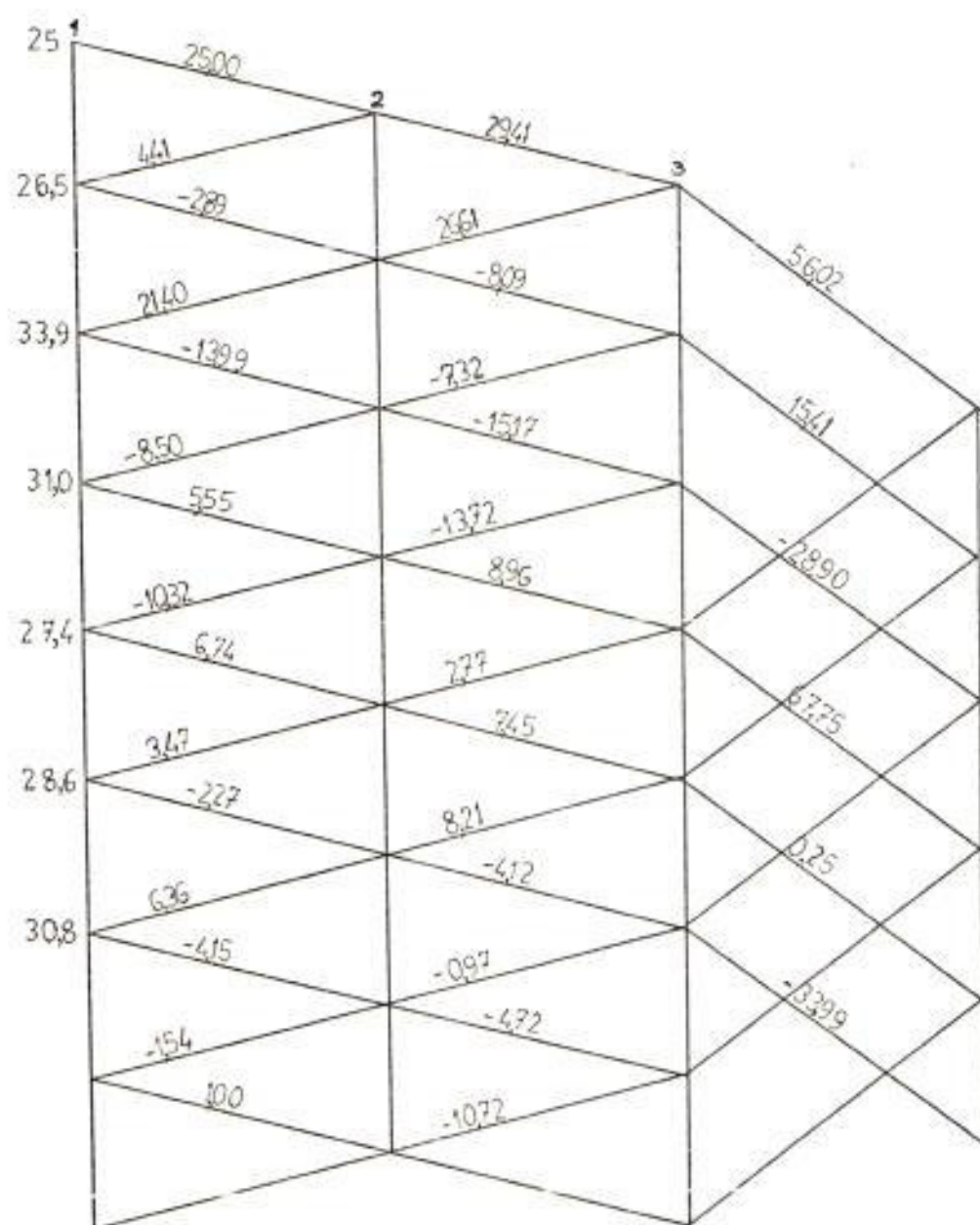


Figura 5.6
Diagrama de lattice

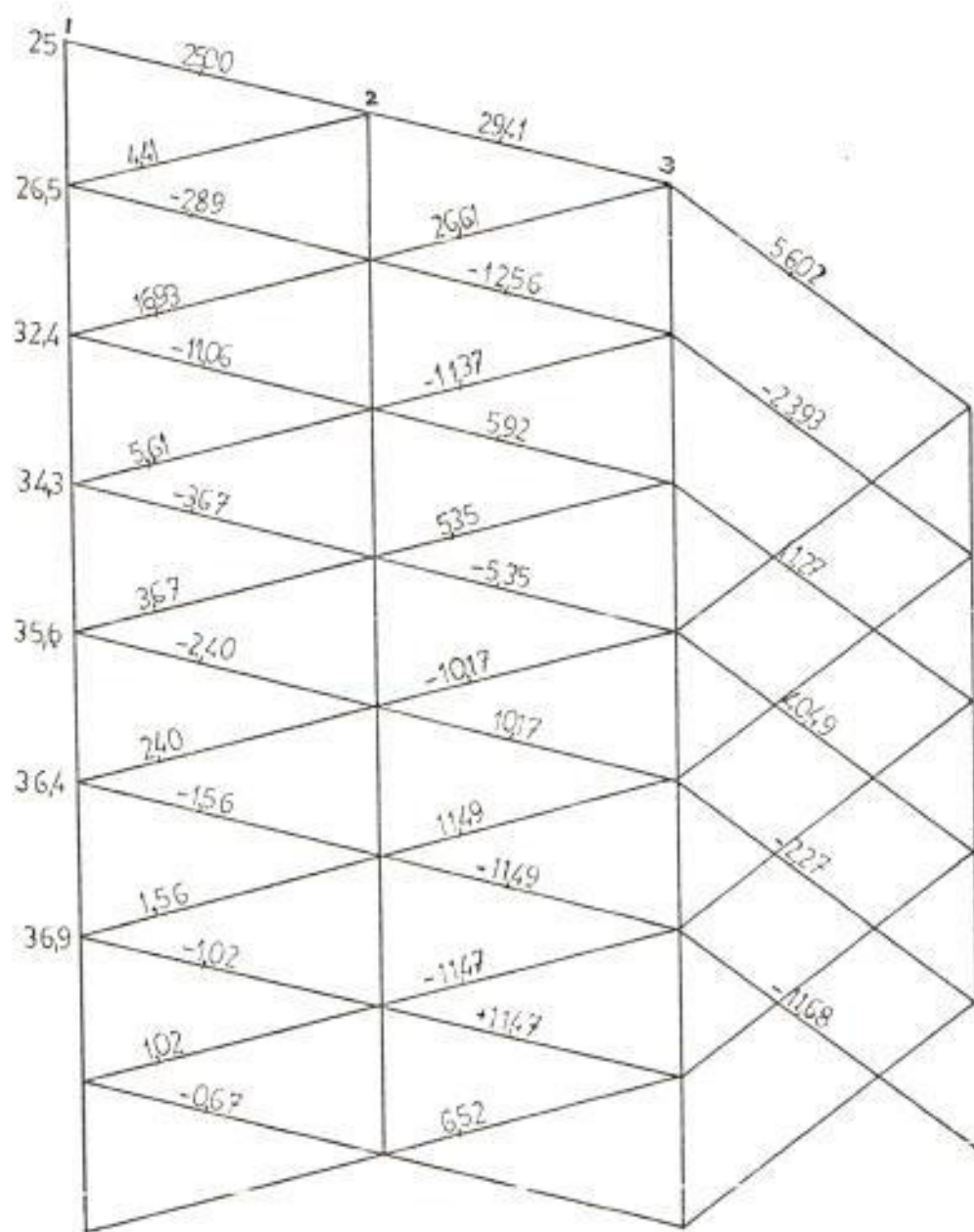


Figura 5.7
Diagrama de lattice

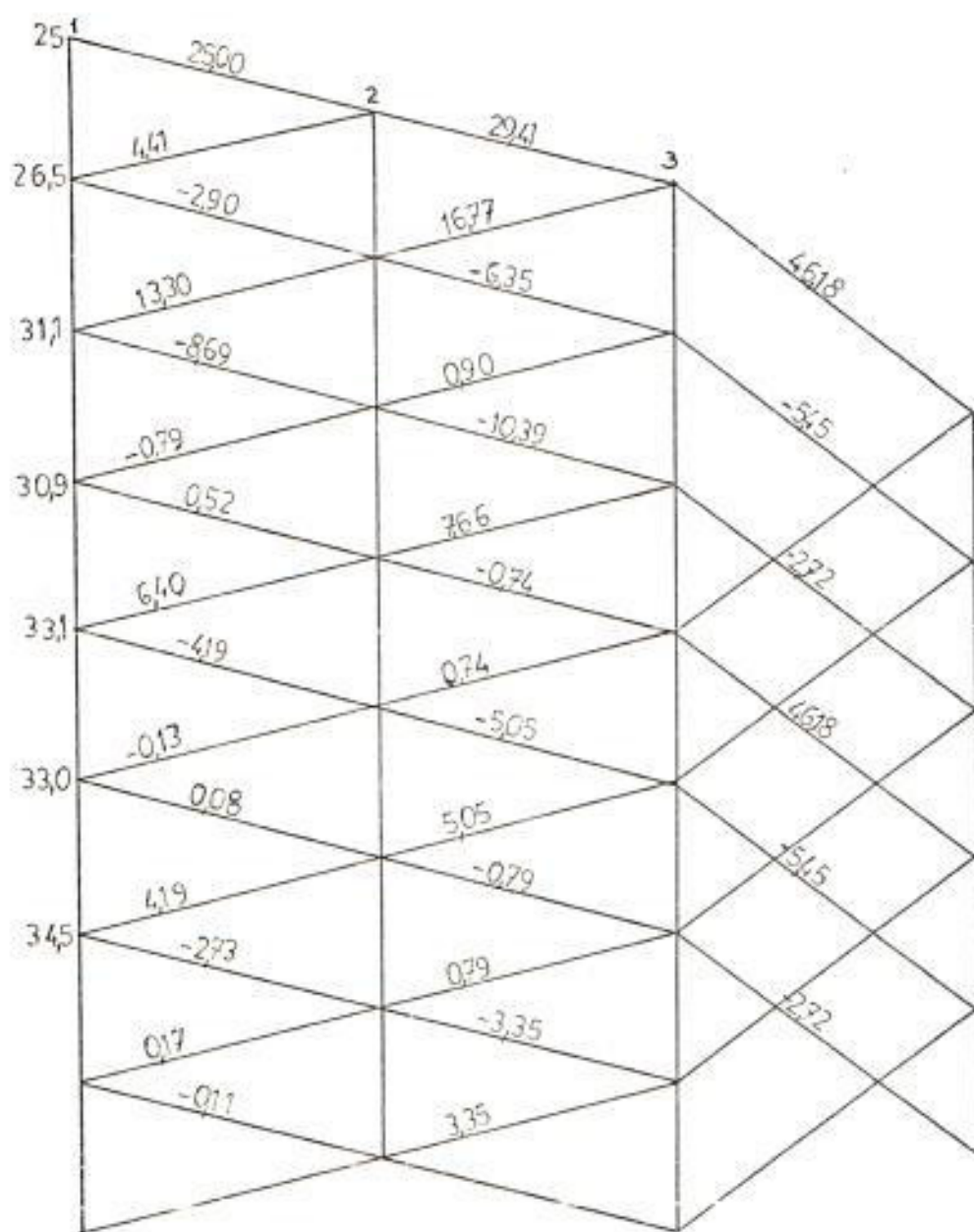


Figura 5.8
Diagrama de lattice

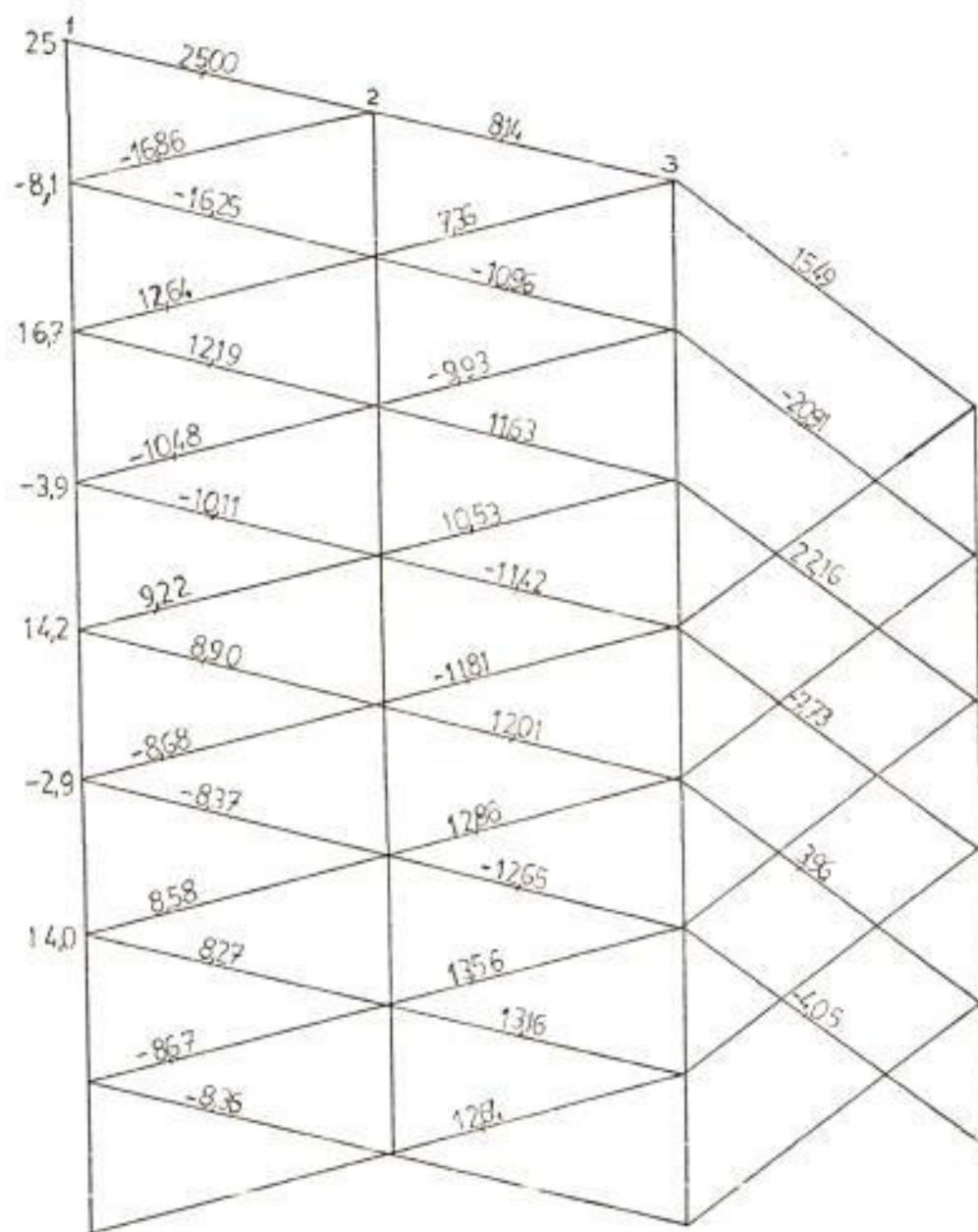


Figura 5.9
Diagrama de lattice

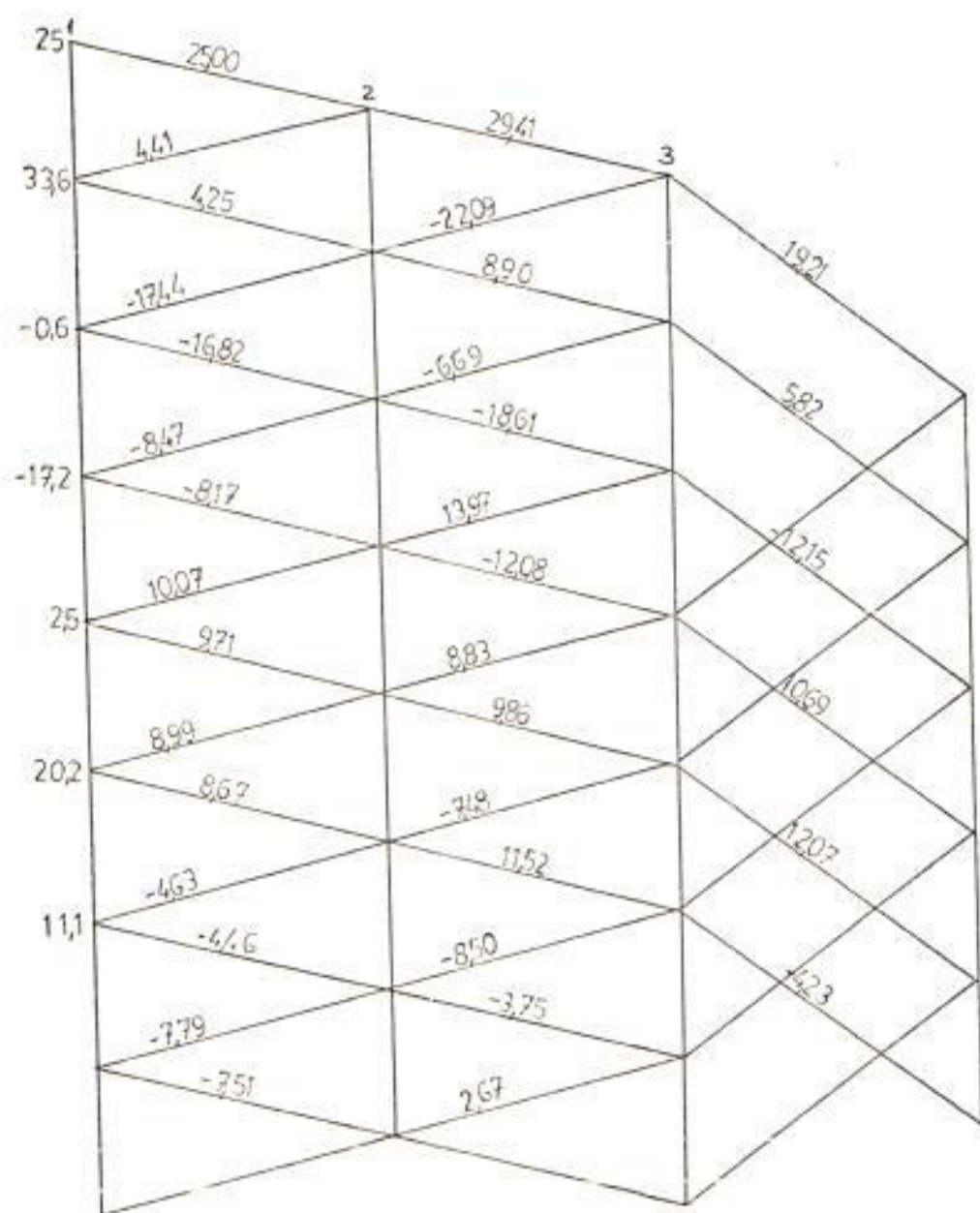


Figura 5.10
Diagrama de lattice

200. 786. POT -068

EJECUCION DEL PROGRAMA

S= 1 AL12= .9641332 ALD1= .1769706 AL23=
 -.1764706 AL32= .9047619 ALD2= -.6047619 AL42=1
 DE32= .6235295 FE12= 1.176471 FE42= .0022381
 DE34= 1.404762 C1= 0 V12= 25 V42= 38 V02= 20
 E12= 20.1 E14= 25 E16= 25 E18= 25
 T1= 1 T2= 1 T3= 3

LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN CON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 1 :

EN LA POSICION UNO: 40.72727 AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS,
 EN LA POSICION DOS: 56.33007 AL TIEMPO 3 MICROSEGUNDOS,
 EN LA POSICION TRES: 63.25779 AL TIEMPO 26 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (1 :), EL PARARRAYOS ACTUA.

EN EL MOTOR SE PRODUCEN SOBREVOLTAJES MUY ALTOS QUE SUPERAN EN MAS DEL 20% EL VOLTAJE DE OPERACION DEL PARARRAYOS. SE RECOMIENDA AUMENTAR LA CAPACIDAD DEL CONDENSADOR O COLOCAR UN BANCO DE CAPACIDADES APROPIADO. ESTE VALOR DE SOBREVOLTAJE ES DE 40.000V.

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	4.411762	4.202529	22.86527	-10.40205	2.522716
	-1.262529	-13.75017	13.75017	4.400742	0
-4.400742		10.3790	-12.7770	1.40106	4.40106
-10.09166		10.07166	0.001257	-0.001257	10.00125
	-10.20177	-10.07166	10.7770	-10.30210	-10.00125
	13.07606	-13.07606	7.000000	-7.000000	-10.00125

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

25	26.61064	1.0081505	1.0081505	-10.40801	-10.40801
	2.6081505	-10.0081505	10.0081505	10.04205	-2.700249
	1.0081505	-14.72161	-10.40809	4.986293	1.44272
17.0000	17.01047	-7.846719	-7.000000	14.29727	-10.40801
	10.40775	13.96835	13.20976	11.48383	-10.00104
	-16.98662	-0.247719	0		

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

56.02241	56.02241	1.0081505	-1.0081505	-10.00909	10.00909
	50.02241	-50.02241	50.01622	-10.01622	-10.01622
	30.07405	22.4707	-22.4707	28.70520	-28.70520
	1.0081505		0.000000		0.100000
	0.100000	1.021831	-4.021831	20.41702	-20.41702

25.42104 25.42104 31.21675 31.21675 0

- LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 1 SON:

25	33.6653	40.72727	38	38	38
38	38	38	38	38	38
38	38	38			

- LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 2 SON:

29.41177	56.35057	38.20336	24.24763	38.044	50.37531
	36.04864	22.70834	41.95174	53.25194	27.62423
	24.64796	51.87607	45.00256	22.77422	

- LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 3 SON:

56.02241	56.69737	21.5505	21.3548	53.08605	51.27025
	17.91205	24.35106	61.19685	43.92361	9.190204
	38.67431	60.3399	28.62153	0	

EJECUCION DEL PROGRAMA

SECT	ALIC= .9241331	ALIC= .1764756	ALIC= .5047619	ALIC=
1764756	ALIC= .9241331	ALIC= .1764756	ALIC= .5047619	ALIC=
DECT= .9241331	DECT= .1764756	DECT= .5047619	DECT= .9241331	DECT=
SECT= 1.9241331	SECT= 1.1764756	SECT= 1.5047619	SECT= 1.9241331	SECT=
TIME= 1.1	TIME= 1.1	TIME= 1.1	TIME= 1.1	TIME=

- LOS MAYORES VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

- CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 2 :

EN LA POSICION 100: 56.02241	AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS.
EN LA POSICION 150: 47.00400	AL TIEMPO 3 MICROSEGUNDOS.
EN LA POSICION 170: 56.02241	AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION Y 2 %, EL PARARRAYOS 10100.

EL MAYOR SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 56.02241

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	51.411765	4.355029	6.789251	6.438141	-14.89249
	-14.35853	14.35853	10.81254	-13.84354	-15.34702
	15.34702	12.8683	-12.8683	-12.40676	12.40676
	11.96176	-11.96176	-11.53273	11.53273	-11.11909
	-11.11909	-10.72029	10.72029	10.35578	-10.35578
	-9.60766	9.60766	9.60766	-9.60766	

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

29.41176	26.61064	-12.56787	-11.57053	5.916381	5.352916
	-5.352916	-10.17058	10.17058	11.40908	-11.40908
	-11.40908	11.40908	6.519665	-6.519665	-6.682447
	6.682446	6.254397	-6.254397	-11.22614	11.22614

11.5372	-11.5372	-10.8213	10.8213	5.56134
-5.56134	-5.821407	5.821407	0	

.7

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

56.02241	-56.02241	-23.93879	23.93879	11.2653	-11.2653
40.43091		-10.45091	-2.271129	2.271129	-11.60390
	11.68793	58.47872	-58.47872	-14.47324	14.47324
	.2409161	-.2409161	40.79619	-40.79619	8.2721
-8.2721	-21.75041	21.75041	57.01564	-57.01564	-2.097611
	3.090641	0	0		

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 1 SON:

25	37.6453	52.87269	23.64147	51.84334	24.50295
	50.8665	20.59325	16.96177	26.16727	45.11709
	27.27172	48.33579	28.03493	47.60766	

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 2 SON:

27.41177	33.40103	38	38	38	38
38	38	38	38	38	38
38	38	38	38	38	38

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 3 SON:

56.02241	20.93560	40.79619	27.64142	47.45735	26.75119
	41.51767	22.21751	44.2544	58.77189	47.50119
27.27172		43.58104	50.17305	0	24.75119

EDUCACION DEL PROGRAMA

9-2	ALD= .594700	ALD= .178470	ALD= .594700
ALD= .178470	ALD= .594700	ALD= .594700	ALD= .594700
ED= .623520	ED= .178470	ED= .095100	ED= .095100
ED= .178470	ED= .095100	ED= .095100	ED= .095100
ED= .095100	ED= .095100	ED= .095100	ED= .095100
ED= .095100	ED= .095100	ED= .095100	ED= .095100

LOS MAYORES VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL ARRANQUE EN LA POSICIÓN 3 1

EN LA POSICIÓN UNO: 42.80742	AL TIEMPO 14 MICROSEGUNDOS.
EN LA POSICIÓN DOS: 58.56793	AL TIEMPO 5 MICROSEGUNDOS.
EN LA POSICIÓN TRES: 46.18182	AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICIÓN (3 1), EL ARRANQUE ACTUO:

EL MAYOR SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 46.18182

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	4.411765	4.203529	14.58126	14.00899	-3.658403
	-3.565755	-17.56689	-16.93482	-2.523135	-2.432638
	16.06227	15.48517	8.00001	7.713075	-12.71307

14.47742	15.90816	-2.749473	-2.650858	-14.71414
-14.37635	-2.517527	-2.1427231	12.50674	

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

29.41175	16.77005	2.04473	-7.499275	17.67786	-20.56710
	-5.545124	5.545122	+20.02547	20.02547	-5.355333
	6.275833	17.07032	-17.07033	17.07032	-12.07010
	-12.28578	12.28578	-15.71524	15.71524	6.324577
	-6.32458	17.53837	-17.53837	-2.364921E-02	
2.364922E-02	-14.91752	14.91752		-5.831044	0

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

46.10102	-46.10102	+5.454545	5.454545	-2.727273	2.727273
	46.10102	-46.10102	-5.454544	5.454544	-2.727273
	2.727273	-46.10101	-46.10101	-5.454545	5.454545
	-2.727272	2.727272	46.10102	46.10102	-2.404545
	5.454545	+2.727273	2.727272	46.10101	+46.10102
	5.454544	5.454544	0	0	

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 1 SON:

17.29034	33.26704	33.98781	33.60001	29.47747	25.5117
	33.26705	33.26704	33.60000	24.02022	24.02022
	33.98781	33.98781	33.60001	18.35525	18.35525

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 2 SON:

29.41175	46.02655	55.56713	37.40449	17.97154	31.60417
	55.08005	50.07015	25.71322	22.02474	11.32769
	55.53837	37.92635	21.00248	22.10059	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 3 SON:

46.10102	40.72727	38	38	38	38
38	38	38	38	38	38
38	38	0			

EJECUCION DEL PROGRAMA

8= 1	AL12= .9641332	AL21= .1764706	AL23=
-1024706	AL32= .5767217	AL34= .7047619	AL45= -1
BE32= .8235295	BE25= 1.176471	BE43= .0952381	
DE34= 1.504762	C1= 1	V1H= 25	VLA= 38
K1H= 28	B1L1= 95	B1L2= 95	V0F= 50
I1= 1	I2= 1	I3= 3	

-LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 1 :

EN LA POSICION UNO: 33.94022	AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS.
EN LA POSICION DOS: 47.93342	AL TIEMPO 3 MICROSEGUNDOS.

EN LA POSICION TRES DE 02241 AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.
PARA ESTA POSICION (1 1 1), EL PARARRAYOS NO ACTUO.

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 06.02241

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	4.411765	-2.504004	21.4057	-12.97721	-8.496471
	5.554266	-10.32378	6.748905	3.470674	-2.269829
	6.351976	-4.157607	-1.535448	1.003745	-8.452873
	5.856508	3.26809	-2.136397	6.804768	-4.506672
	-7.920822	5.183185	-2.368429	1.548276	6.831321
	-4.465737	-3.98171	2.341415	-2.924528	

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

27.41176	26.61064	-8.088977	-7.318599	-15.17109	-10.72215
	8.956704	2.788217	7.401261	8.205006	-4.117008
	-1.970593	-4.718458	-10.72215	3.07500	2.788215
	6.160011	6.817674	-4.049504	-8.667426	-2.788215
	-3.431802	-1.901288	7.362172	1.412150	-10.72215
	-4.275111	-4.022702	3.468709	0	

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

50.02241	50.02241	-10.40778	15.40758	+26.87701	33.91731
	67.94733	-67.74733	1.202673	+122.6473	+122.6473
	73.98572	50.00568	-50.00568	4.081576	-4.081576
	-17.00354	15.00354	37.07276	-35.07276	11.27076
	1.670743	-4.037743	4.037743	3.185667	-3.185667
	-10.07807	10.07807	0	0	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 1 SON:

25	26.82773	37.94022	30.99901	27.42204	28.62458
	30.82728	30.07554	27.29518	30.43007	30.82728
	28.06733	27.24918	29.61476	28.37417	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 2 SON:

27.41176	47.97719	23.44075	23.67427	35.85771	34.78456
	29.1219	21.64267	30.56727	35.74564	22.88018
	22.7068	24.0910	26.72216	25.47011	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 3 SON:

34.02241	40.81431	11.71757	22.44245	37.10573	34.0115
10.86965		24.06896	35.03514	26.45221	18.87751
	33.8643	30.61842	21.18035	0	

REDUCCION DEL PROGRAMA

54 2	AL24+ .5941332	AL24+ .1764706	AL23+
YCCER 1+176	AL32+ .5947619	AL34+ .6047619	AL43+1

2000 16527 1.021019 16527 1.021019 16527 1.021019
 16524 1.504712 C1= 1 VIM= 25 VLA= 28 VOF= 30
 KVM= 20 BIL1= 95 BIL2= 95 BIL3= 95
 T1= 1 T2= 1 T3= 3

-LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 2 :

EN LA POSICION UNO: 37.96593 AL TIEMPO 28 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION DOS: 43.45709 AL TIEMPO 3 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION TRES: 56.02241 AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (2), EL PARARRAYOS ACTUO,

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 56.02241

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	3.411705	-2.081034	16.80263	-11.0453	5.61070
	-5.897072	3.467632	-2.057715	2.357715	-1.587414
	1.517121	-1.021845	1.021845	-0.002034	0.002034
	-4.078713	4.078713	7.362144	1.002144	-1.002144
	1.671021	-1.100046	1.100046	1.558000E-02	-1.558000E-02
	1.558000E-02	-5.227445E-02	5.227445E-02	0.227445E-01	-0.227445E-01
	0.227445E-01	0.310000E-02	0.310000E-02		

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

27.91074	24.91074	-10.51074	-11.71074	5.91074	5.75074
	-0.75074	-10.11074	10.11074	14.45074	-14.45074
	-11.45074	11.45074	0.01074	-0.01074	0.01074
	0.01074	0.01074	-0.01074	-11.01074	11.01074
	10.01074	-11.01074	-10.01074	10.01074	0.01074
	0.01074	-0.01074	0.01074	0	0

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

36.02241	-56.02241	-23.92241	25.92241	11.2693	-11.2693
34.97759	0.00000	-10.47759	-2.07759	2.07759	-11.07759
	11.07759	38.47759	-50.47759	-14.47759	14.47759
	1.245714	-1.245714	60.24571	-60.24571	0.24571
	-0.24571	-21.75041	21.75041	57.01964	-57.01964
	0.01964	3.01964	0	0	0

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIDAD 1 SON:

25	24.50703	22.00703	24.07217	25.60229	26.37250
	26.37250	22.00703	22.00703	25.71074	27.61074
	22.00703	22.00703	22.00703	25.60229	26.37250

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIDAD 2 SON:

25	29.41177	43.45455	38	38	38
	38	38	38	38	38
	38	38	38	38	38

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIDAD 3 SON:

56.02241	32.08362	43.35292	27.82142	49.48908	26.53166
	44.51967	32.31756	44.2544	26.77186	49.5372
27.53708		43.56134	32.17859	0	

EJECUCION DEL PROGRAMA

EP= 3	AL12= .9641332	AL21= .1764706	AL33=
.1764706	AL32= .9047619	AL34= .9047619	AL43= -1
BE32= .8235295	BE23= 1.176471	BE43= .0952381	
BE34= 1.904762	E1= 1	V111= 25	VLA= 38
KVM= 28	BIL1= 95	BIL2= 95	VDF= 50
T1= 1	T2= 1	T3= 3	

-LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 3 :

EN LA POSICION UNO: 57.06402 AL TIEMPO DE MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION DOS: 59.82342 AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION TRES: 46.18182 AL TIEMPO 3 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (3) EL PARARRAYOS ACTUA.

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR DE DE 46.18182

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

20	4.411762	-3.884604	30.30168	-6.455501	-1.773488
10187608		6.400326	-3.184377	-1.128619	
584070678 02		4.174510	2.73625	1.711520	-1.114907
2.740709		-1.791241	1.233270	-1.180066	1.005710
	-1.181781	.271856	-1.1164	1.200256	-1.754597
	.2649892	-1.1732272	1.661844	-1.623222	.2221662

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

27.41174	16.77005	-6.332402	.8878579	-10.18342	1.661476
	-1.746484	1.7404891	-5.053471	5.053471	-1.7528811
	.7920819	-3.351979	3.351979	.7231551	.7231551
02000000		2.000000	-1.6055421	1.6055421	-1.400000
	1.498566	-1.407912	.489912	-1.000000	1.000000
	-1.0019567	.7819568	-1.6033138	0	

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

46.18182	-46.18182	-5.454544	5.454544	-2.727272	2.727272
	46.18182	-46.18182	-5.454544	5.454544	-2.727272
	2.727272	46.18182	-46.18182	-5.454544	5.454544
	-2.727272	2.727272	46.18182	-46.18182	-5.454544
	5.454544	-2.727272	2.727272	46.18182	-46.18182
	-5.454544	5.454544	0	0	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 1 SON:						
25	26.52773	31.13391	30.65059	33.07514	33.0306	
34.47667		34.53614	35.4652	35.56174	36.20828	
	36.30979	36.72544	36.8172	37.09452		
-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 2 SON:						
29.41177	39.52942	30.35883	37.28751	32.94533	37.20712	
	34.64802	37.27600	35.71457	37.39066	36.50143	
	37.51009	36.97043	37.61854	37.31607		
-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 3 SON:						
46.18182	40.72727	38	38	38	38	
38	38	38	38	38	38	
38	38	38	38	38	38	

EJECUCION DEL PROGRAMA

SE 1	ALICIA 1.961100	ALICIA 1.974708	ALICIA 1.988316
1.174708	ALICIA 1.947619	ALICIA 1.961227	ALICIA 1.974835
SECTOR 1.920000	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.974708
SECTOR 1.947619	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.974708
SECTOR 1.947619	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.974708
SECTOR 1.947619	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.174708	SECTOR 1.974708

-LOS MÁXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-EN LA POSICIÓN UNO EN LA POSICIÓN 1 :

EN LA POSICIÓN UNO: 25 AL TIEMPO 0 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICIÓN DOS: 34.47667 AL TIEMPO 1 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICIÓN TRES: 10.39422 AL TIEMPO 10 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICIÓN (1) EL PARÁMETRO NO ACTÚA.

EL MÁXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 10.39422

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:						
25	-16.86405	-16.25748	12.61501	12.19147	-10.9061	
10.10577		8.210003	8.607410	-8.607410	-8.210003	
	8.577356	8.207717	-8.607410	-8.356368	8.517706	
	8.211618	-8.190065	-7.704018	7.828194	7.547424	
	-7.757069	-7.479349	7.800005	7.570864	-7.973079	
	-7.6874	7.793226	7.517565	-7.489739		

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:						
8.135617	7.366823	-10.3753	-9.930002	11.60041	10.50728	
	-11.41524	-11.80754	12.01	12.65718	-12.65718	
	-13.05813	17.16141	12.61016	-12.48023	-11.87167	
	11.60022	10.05001	-11.07404	-11.70467	11.65446	
	12.3227	-11.94974	-12.5825	12.47999	11.46412	

-11.35429 10.41611 10.44573 0

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

4.47647	-15.49647	-20.90833	20.90833	22.16269	-22.16269
	-7.73031	7.73031	3.961847	-3.961847	-4.04802
4.04852	18.07527	-18.07527	-20.18305	20.18305	18.59371
	-18.07527	-4.66379	4.66379	3.624317	-3.624317
	-5.978527	5.978527	18.98071	-18.98071	-18.06808
	18.24908	0	0		

DE SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 1 SON:

	-6.128834	16.71265	-3.683442	14.232	-3.683442
	14.01066	-3.012938	13.71619	-2.386386	12.386386
	-2.247615	13.17076	-3.485021	12.82977	

DE SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 2 SON:

4.05647	4.051173	4.22655	5.204591	5.537049	5.710751
	5.247431	5.204549	5.017923	5.4415	5.001705
	5.204549	5.204549	5.012218	5.23931	

DE SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 3 SON:

4.17647	-0.70056	16.75393	-4.472302	16.75393	-3.917302
	17.70714	2.167256	16.47514	-4.266705	27.00112
	-4.777424	14.88657	-3.305401	0	

POSICION DEL PARARRAYO

ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000
ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000	ALTA 1.001000

LOS MAYORES VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

CON EL PARARRAYO EN LA POSICION 1 :

EN LA POSICION UNO: 20 AL TIEMPO 0 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION DOS: 9.135647 AL TIEMPO 1 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION TRES: 18.39422 AL TIEMPO 16 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (1 2 3), EL PARARRAYO NO ACTUA.

EL MAYOR SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCIÓ EN EL MOTOR ES DE 18.39422

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

5	-16.85475	-16.25740	12.64501	12.19147	-10.4861
	-10.10777	9.218732	0.607412	-8.681754	-6.073452
2	0.573356	0.267713	-8.667204	-8.356768	8.517306

7.517545	7.517545	7.517545	7.517545	7.517545
-7.517545	-7.479349	7.652509	7.570064	-7.570064
-7.6874	7.797226	7.517545	7.489739	

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

8.135647	7.360823	-10.7753	-9.930032	11.63541	10.52728
	-11.41924	-11.89754	12.01	12.85718	-12.65327
	-13.55673	13.16141	12.64416	-12.48323	-11.67167
	11.88522	10.85801	-11.07404	-11.70463	11.49446
	12.3229	-11.94774	-12.8815	12.17897	11.46412
	-11.75129	-10.61911	10.64573	0	

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

15.47647	-15.47647	-20.70533	20.90533	22.16269	-22.16269
	-7.73031	7.73031	3.961847	-3.961847	-4.01952
4.04952	18.07527	-18.07527	-20.17309	20.17309	18.51371
	-16.07371	-4.663376	4.663376	3.624017	-3.624017
	-3.73651	5.530527	18.78071	-18.78071	-18.78071
	18.04896	0	0		

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 1 SON:

20	-6.12333	16.71233	-3.88844	19.811	-3.88844
	14.91066	-3.912898	12.71619	-2.754294	12.75733
	-1.247315	13.17376	-2.488021	12.82977	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 2 SON:

5.130647	4.631177	6.02673	5.334591	5.577045	5.740751
	5.337331	5.534319	5.517523	5.4318	5.337331
	5.504891	5.262219	5.012205	5.337331	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 3 SON:

15.47647	0.40886	16.70583	-6.472737	18.07432	-7.917553
	17.7871	-6.167098	16.47574	-2.242729	17.55467
	-6.877862	16.3462	-5.708304	0	

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

SE=3	AL12= .991002	AL21= .174706	AL33=
AL13=	AL32= .5047619	AL34= .5047619	AL43=1
DE20= .6735278	DE33= 1.176471	DE43= .0952381	
DE34= 1.506762	CI= 2	VIN= 25	VAN= 20
EVN= 20	BIL1= 95	BIL2= 95	VOP= 50
BIL3= 95			
TI= 1	T2= 1	T3= 3	

LA MUESTRA DE SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICIÓN 3 :

EN LA POSICIÓN UNO: 20 AL TIEMPO 0 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICIÓN DOS: 8.135647 AL TIEMPO 1 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICIÓN TRES: 16.37422 AL TIEMPO 10 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (3), EL PARARRAYOS NO ACTUA.

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 18.39422

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	-16.06430	-16.25948	12.61501	12.19147	-10.48641
-10.10959	8.577066	8.265713	8.587412	-8.664704	-8.373403
	8.211818	-8.198263	-7.764218	-8.356368	8.517006
	-7.757589	-7.479349	7.852509	7.828196	7.547424
	-7.6874	7.797206	7.517565	-7.489939	-7.973399

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

8.130e47	7.360823	-10.9703	-9.950032	11.63541	10.53728
	-11.41524	-11.80754	12.01	12.80718	-12.17707
	-13.80893	13.16101	12.64416	-12.48333	-11.97187
	11.80522	10.75801	-11.03404	-11.79663	11.17076
	12.3229	-11.94774	-12.5825	12.17799	12.96112
	-11.25405	10.61811	10.64573	0	

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

15.45e47	-15.45147	-20.71533	20.90833	22.13049	-22.11215
	-7.25031	7.25031	3.961847	3.961847	-3.961847
	16.17223	-16.17223	-20.17005	20.17005	16.17223
	-15.00071	15.00071	4.660096	3.660096	-3.660096
	-5.908527	5.908527	10.76071	-10.76071	-10.76071
	16.31810	0	0	0	0

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCE EN LA UNION 1 SON:

25	-8.110876	16.71265	-3.867442	14.022	-20.81405
	14.01036	-3.012598	13.71619	-3.081796	12.72802
	-2.247615	13.17376	-2.485021	12.82477	

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCE EN LA UNION 2 SON:

51.036e47	4.0221173	4.0221173	5.534591	5.537049	5.741701
	5.343431	5.504368	5.517923	5.4415	5.271725
	5.504894	5.202379	5.312305	5.339831	

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCE EN LA UNION 3 SON:

15.19e47	-5.40886	16.70383	-6.472953	18.39422	-7.817952
	17.9874	-6.187256	16.47594	-6.263728	17.55463
	-6.977606	16.8665	-5.300701	0	

EJECUCION DEL PROGRAMA

8=1	AL12= .3641002	AL21= .1749706	AL35=
-1.764706	AL32= .5047615	AL34= .5047615	AL47=1
CCA	EE22= .8235295	DE23= 1.174471	DE42= .0952381

1004 DE 14- 1.504782 C1= 3 VIII= 15 LRA= 18 VPA= 10
 KVM= 28 BIL1= 95 BIL2= 95 BIL3= 95
 T1= 1 T2= 1 T3= 3

-LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:
 -CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 1 :

EN LA POSICION UNO: 33.4653 AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION DOS: 27.41177 AL TIEMPO 1 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION TRES: 9.534279 AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (1), EL PARARRAYOS NO ACTUA.

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 9.534279

LOS VALORES DEL TRINOR SECTOR SON:

4.111740	4.263209	-17.43753	-16.01789	0.170244
0.111018	16.06746	9.204716	0.180407	0.000794
-4.077870	-4.460774	-7.78140	-7.507207	1.000176
0.001111	5.000700	0.070792	1.152140	1.110310
-0.000000	-0.781211	-2.070000	-0.040004	0.000100
0.171860	0.000000	-1.001031	-0.000000	

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

27.41177	-20.00000	0.000000	-0.000000	10.000000
-11.00000	0.000001	7.000000	-7.000000	11.000000
-0.000000	-0.000000	2.000000	-0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	-0.000000	0.000000
11.00000	-11.00000	0.000000	-0.000000	0.000000
0.000000	-11.00000	0.000000	0	0.000000

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

17.001306	-10.000000	0.000000	-0.000000	12.100000
10.000000	0.000000	12.000000	-12.000000	-4.000000
4.000000	0.000000	7.000000	-0.000000	0.000000
-4.000000	0.000000	11.000000	-11.000000	0.000000
-6.000000	-4.000000	0.000000	0.000000	-0.000000
0.000000	0.000000	0	0	0

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 1 SON:

33.4653	-0.000000	-17.000000	0.000000	0.000000
10.000000	0.000000	0.000000	0.000000	11.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 2 SON:

27.41177	10.000000	-7.000000	11.000000	15.000000
0.000000	-0.000000	0.000000	10.000000	7.000000
1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNION 3 SON:

7.518857	4.534279	4.704432	1.259475	4.140765	7.05744
5.99078	3.524961	3.527452	5.052806	5.52793	4.549121
	3.675365	4.136665	0		

EJECUCION DEL PROGRAMA

S= 2	AL12= .9041332	AL21= .1761706	AL22=
- .1764706	AL32= .9047619	AL34= -.9047619	AL42= -1
BE32= .6235295	BE23= 1.176471	BE43= .0952381	
BE34= 1.904762	CI= 3	VIN= 25	VLA= 38
KVM= 28	BIL1= 95	BIL2= 95	BIL3= 95
T1= 1	T2= 1	T3= 3	VOF= 50

-LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 2 :

EN LA POSICION UNO: 33.6657 AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION DOS: 29.41177 AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION TRES: 5.004279 AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (2), EL PARARRAYOS NO ACTUA.

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 9.534279

LOS VALORES DEL PRIMER SECTOR SON:

25	4.411765	4.207525	-17.44063	-16.81207	16.475274
	-9.171226	10.06746	5.766776	5.968427	5.864091
	-1.621937	-4.963776	-7.78248	-1.507203	10.64556
	1.636747	5.763788	5.576342	1.152143	11.10513
	-5.924255	-3.780017	2.070555	-2.004004	11.00678
	1.172865	2.965557	1.59151	-1.077909	

LOS VALORES DEL SEGUNDO SECTOR SON:

25	-10.0715	8.502955	-1.687405	-18.4354	13.77575
	-12.07752	8.820591	5.860222	-7.47895	11.51514
	-8.498486	-3.751768	2.685109	-9.305846	2.840026
	-1.201564	2.040955	6.524365	-4.999071	2.107035
	-1.713911	-4.14487	3.166062	-2.916368	2.04261
2.19585	-1.734549	2.64905	0		

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

15.21506	-15.21506	5.815767	-5.815767	-12.154	12.154
10.69465		-10.69465	12.06679	12.06679	-4.234314
	4.234314	7.871516	-7.871516	5.55362	-5.55362
-4.234314		4.234314	11.87368	-11.87368	6.841000
	-6.841000	-6.75768	6.75768	5.604732	-5.604732
	0.052049	-8.052049	0	0	

-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 1 SON:						
25	33.6653	-1.596118	-17.24255	-1.531291	20.18576	
	11.09215	-4.201533	-2.460396	8.899734	11.1627	
3.461614		-1.6209446	3.805617	7.862725		
-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 2 SON:						
29.41177	16.22177	-9.071322	-7.175085	11.51572	15.55393	
	3.305671	-3.315067	3.323393	10.05198	7.241541	
	1.303059	1.632753	5.671214	6.769715		
-LOS SOBREVOLTAJES QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 3 SON:						
7.318869	9.534279	4.904432	1.639496	4.040769	7.05744	
5.99078	3.524961	3.527492	-5.052806	5.52793	4.549121	
	3.675363	4.136665	0			

EJECUCION DEL PROGRAMA

SE 3	ALD1= .0041032	ALD1= .0041032	ALD1= .0041032	ALD1= .0041032	ALD1= .0041032
-1.1744706	ALD2= .0047617	ALD2= .0047617	ALD2= .0047617	ALD2= .0047617	ALD2= .0047617
SECC= .0000000	SECC= .0000000	SECC= .0000000	SECC= .0000000	SECC= .0000000	SECC= .0000000
SECC= 1.0000000	SECC= 1.0000000	SECC= 1.0000000	SECC= 1.0000000	SECC= 1.0000000	SECC= 1.0000000
VM= 25	VM= 25	VM= 25	VM= 25	VM= 25	VM= 25
VM= 25	VM= 25	VM= 25	VM= 25	VM= 25	VM= 25
TM= 1	TM= 1	TM= 1	TM= 1	TM= 1	TM= 1

-LOS MAXIMOS VALORES DE SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCEN SON:

-CON EL PARARRAYOS EN LA POSICION 2 :

EN LA POSICION UNO: 33.6653 AL TIEMPO 2 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION DOS: 29.41177 AL TIEMPO 1 MICROSEGUNDOS.
 EN LA POSICION TRES: 9.534279 AL TIEMPO 4 MICROSEGUNDOS.

PARA ESTA POSICION (2), EL PARARRAYOS NO ACTUA.

EL MAXIMO SOBREVOLTAJE QUE SE PRODUCE EN EL MOTOR ES DE 9.534279

LOS VALORES DEL PRIMER SECCION CON:						
25	9.411765	4.200007	-17.44003	-16.81709	-6.495214	
	-8.171216	19.06746	9.706076	8.908427	8.638491	
	-4.629833	-4.460716	-3.78146	-7.507203	1.886466	
	1.9546707	5.707708	5.074042	1.152143	1.110319	
	-3.520055	-3.780027	-2.078555	-2.004004	2.250666	
	2.172862	2.063557	1.99151	-1.077009		

CON PARARRAYOS EN LA POSICION 1:						
29.41176	-12.07529	8.702850	-6.607486	-16.6056	10.77375	
	-12.07529	8.702850	5.050220	-7.47875	11.74514	
	-8.498466	-3.751769	2.480109	-9.305846	2.010025	
	-1.2015626	1.204057	4.524385	-4.558071	2.109025	
	-1.711511	-4.14407	3.164962	-2.916308	0.04201	
2.19005	-1.751543	2.64705	0			

LOS VALORES DEL TERCER SECTOR SON:

17.21708	-19.21304	5.810767	-5.810767	-12.154	12.154
10.67465		-10.67465	10.67465	-12.06674	-12.06674
	4.224814	7.871818	-7.871818	5.59262	-5.59262
-4.220189		4.220189	-4.220189	-11.89808	11.89808
	-6.641068	-6.641068	6.641068	9.604942	-9.604942
	6.652089	-6.652089	6.652089	0	0

-LOS SOBRESALTIMOS QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 1 SON:

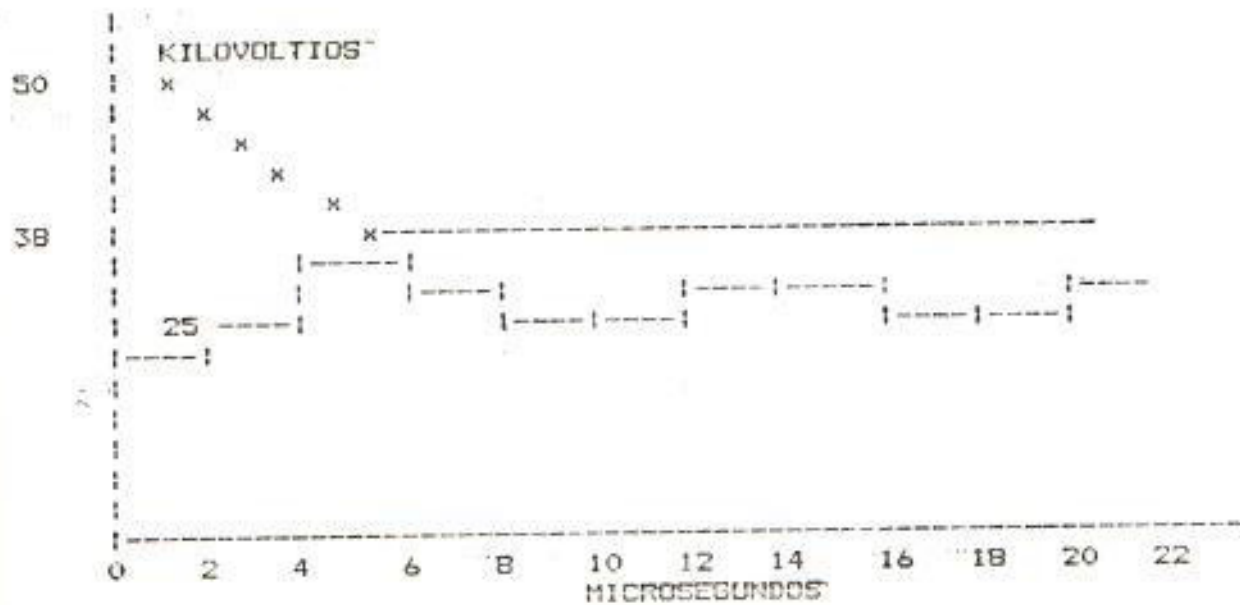
33.6655		-33.6655	33.6655	2.531291	-2.531291
11.07215		-11.07215	11.07215	5.898204	-5.898204
3.461614		-3.461614	3.461614	7.862705	-7.862705

-LOS SOBRESALTIMOS QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 2 SON:

16.22177		-16.22177	16.22177	11.51775	-11.51775
5.04571		-5.04571	5.04571	10.15185	-10.15185
1.101229		-1.101229	1.101229	4.782112	-4.782112

-LOS SOBRESALTIMOS QUE SE PRODUCEN EN LA UNIÓN 3 SON:

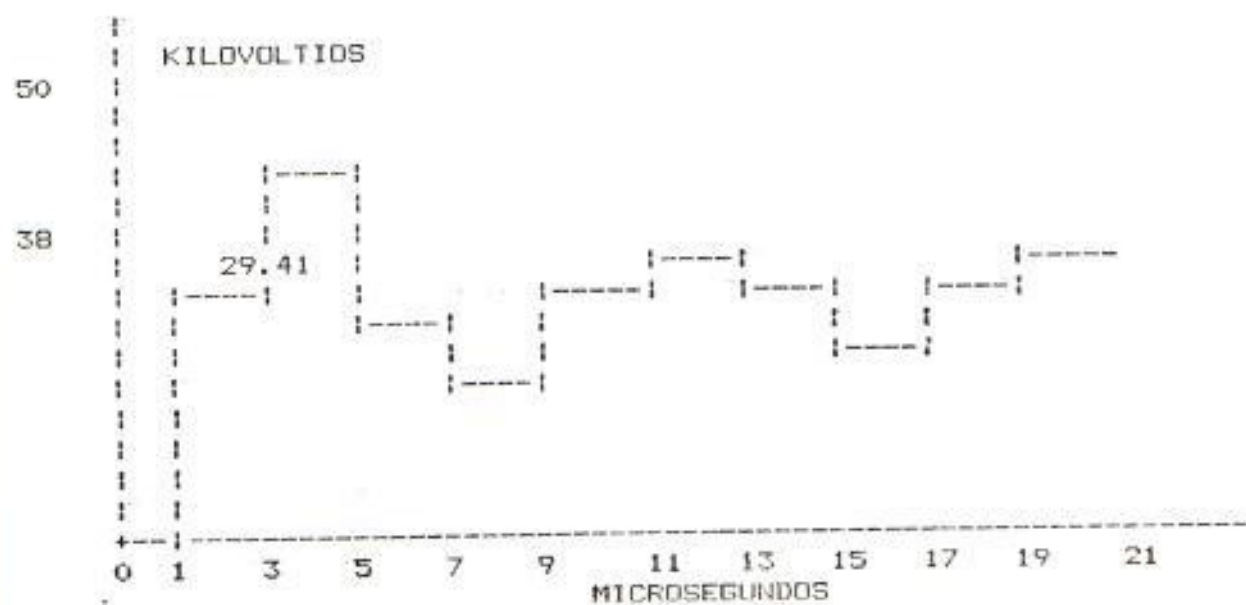
4.704408		-4.704408	4.704408	4.010737	-4.010737
5.700703		-5.700703	5.700703	5.022737	-5.022737
3.870687		-3.870687	3.870687	0	0



1ST 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 1
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 1

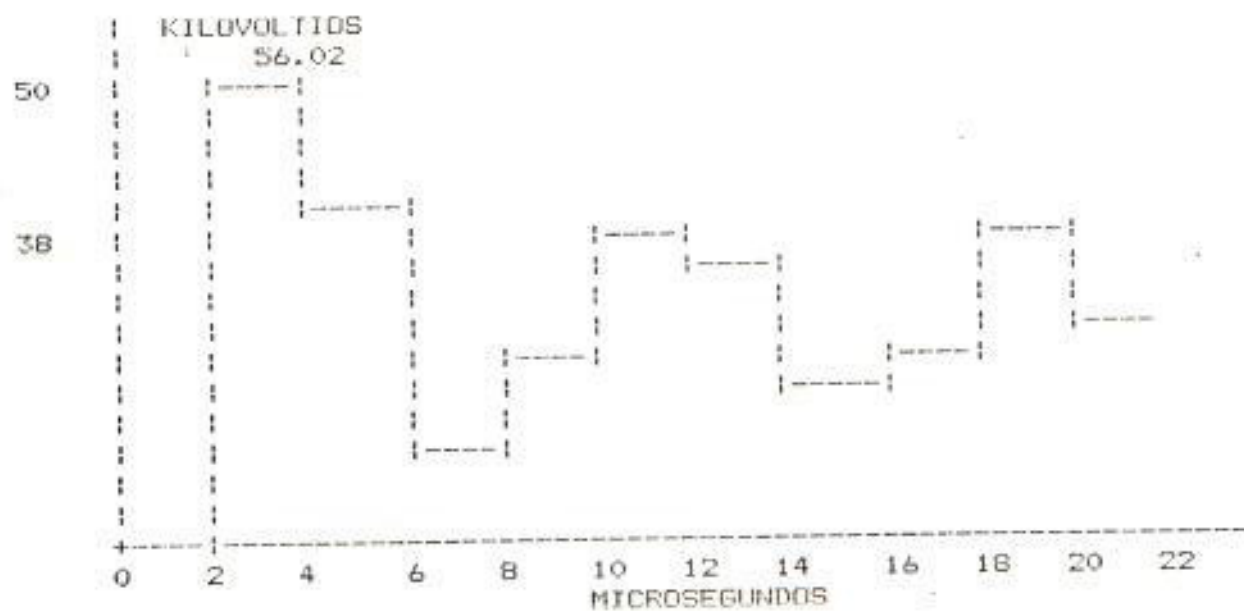
Gráfico del Computador



IST 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 1
 Posición del CAPACITOR 1
 Posición del gráfico 2

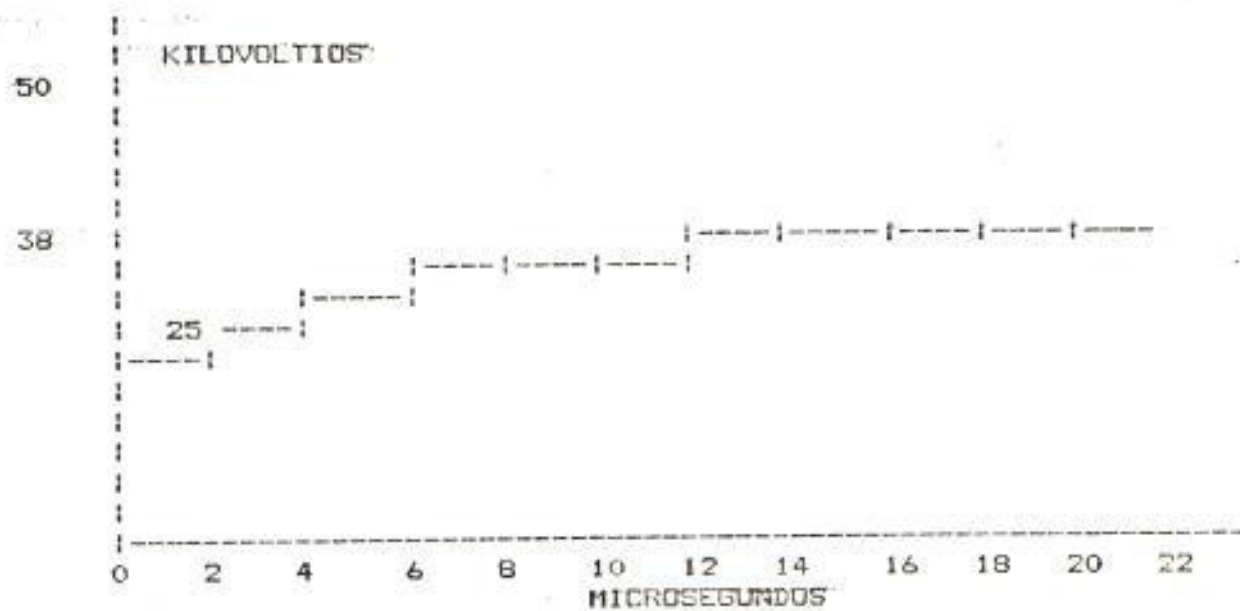
Gráfico del Computador



LIST 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 1
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 3

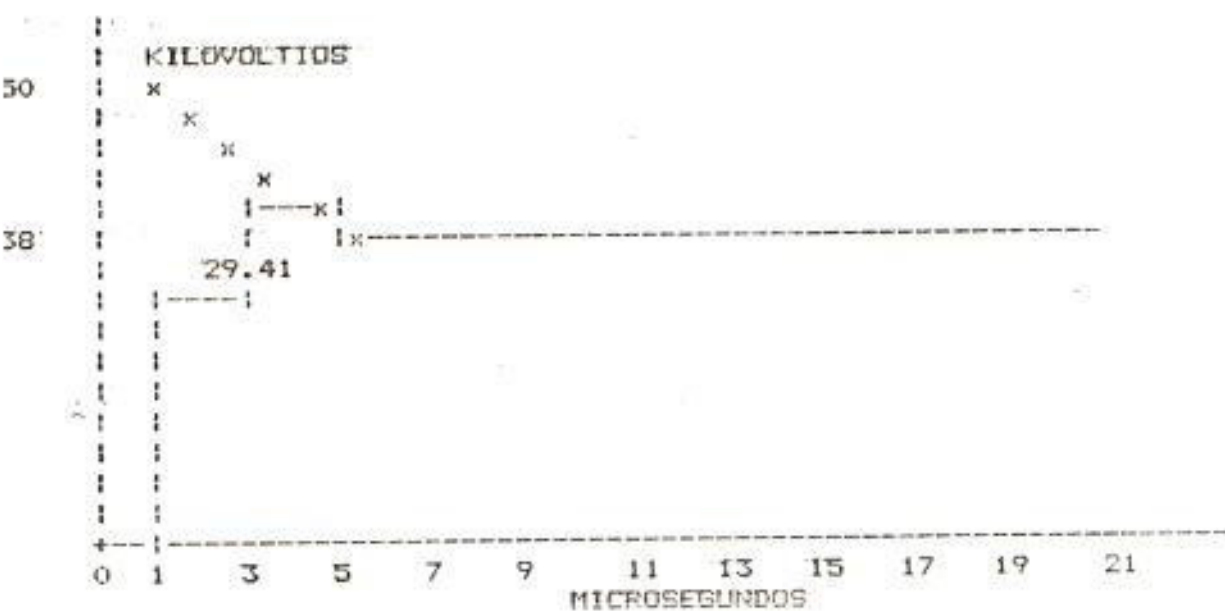
Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 2
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 1

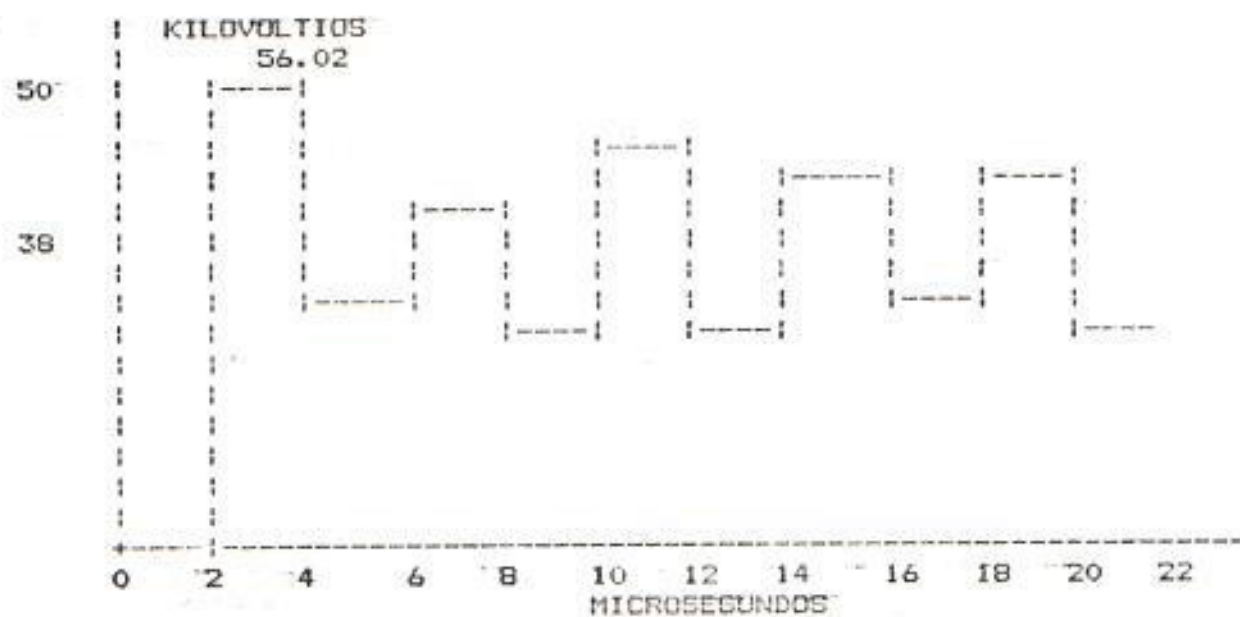
Gráfico del Computador



2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 2
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 2

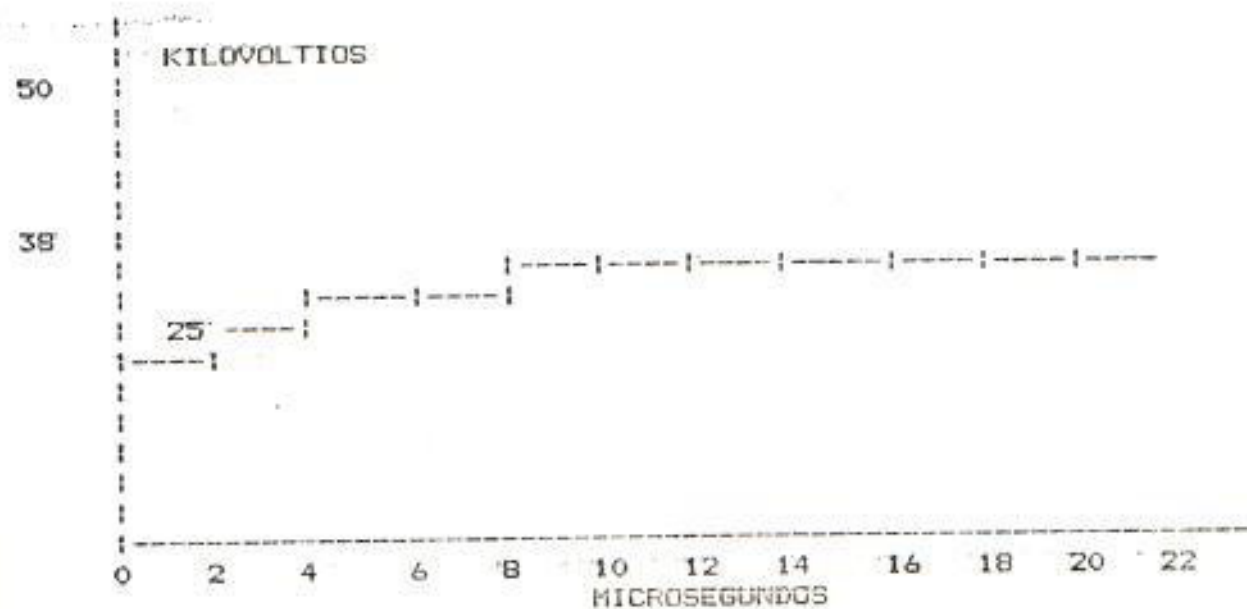
Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 2
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 3

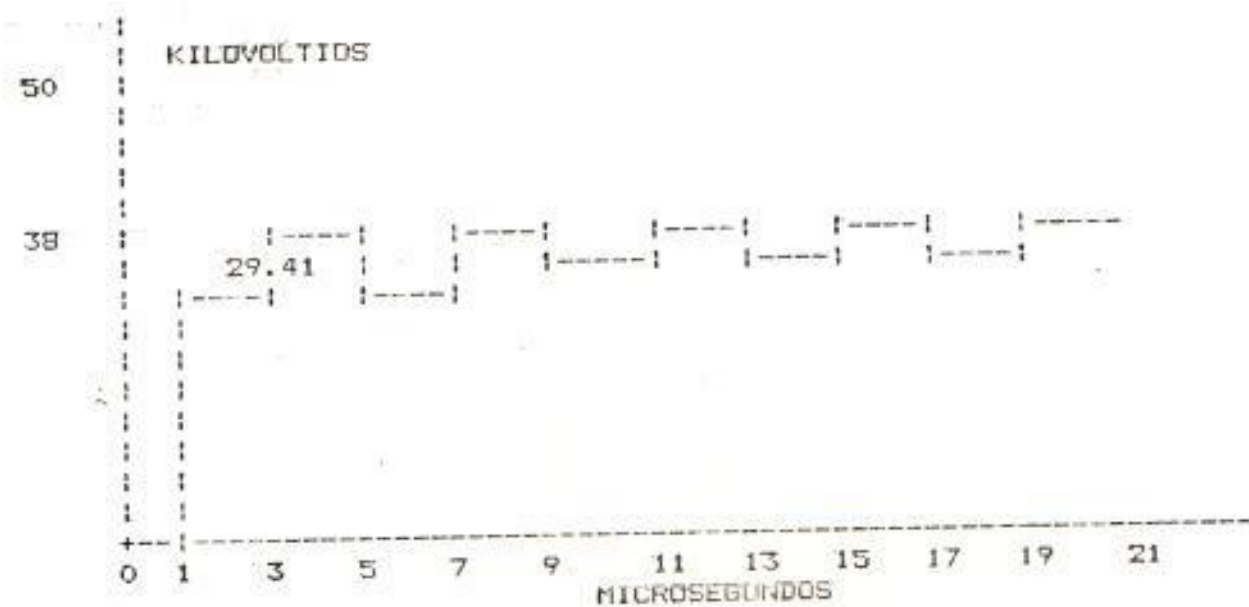
Gráfico del Computador



BT 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 3
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 1

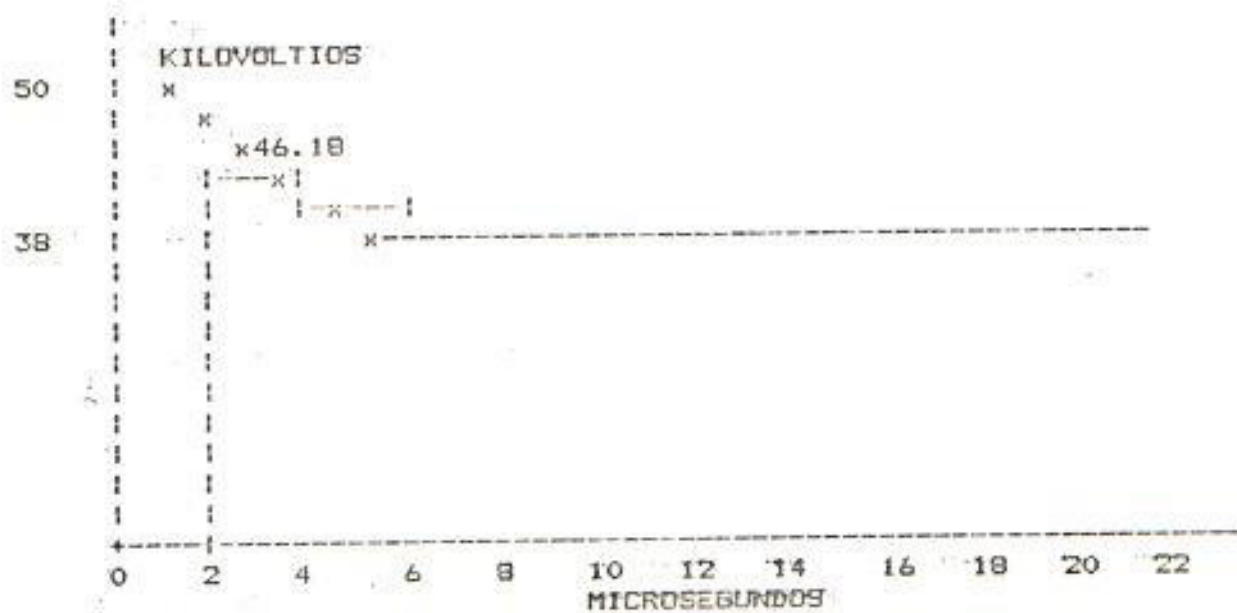
Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 3
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 2

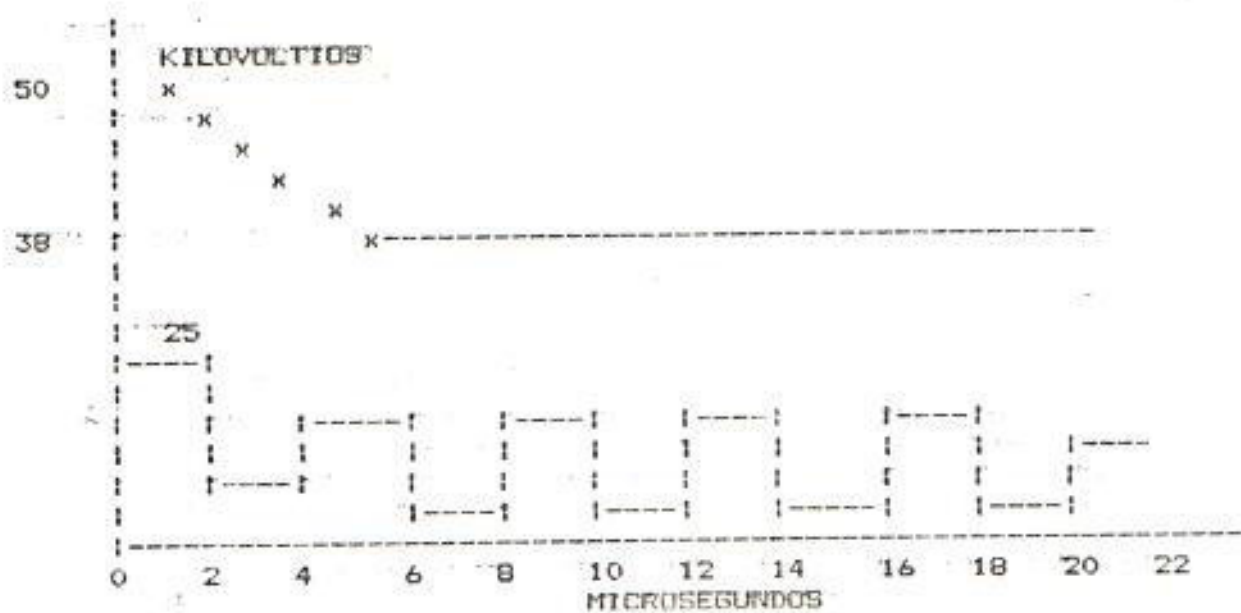
Gráfico del Computador



BT 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS 3
 Posición del CAPACITOR 1
 Gráfico de la posición 3

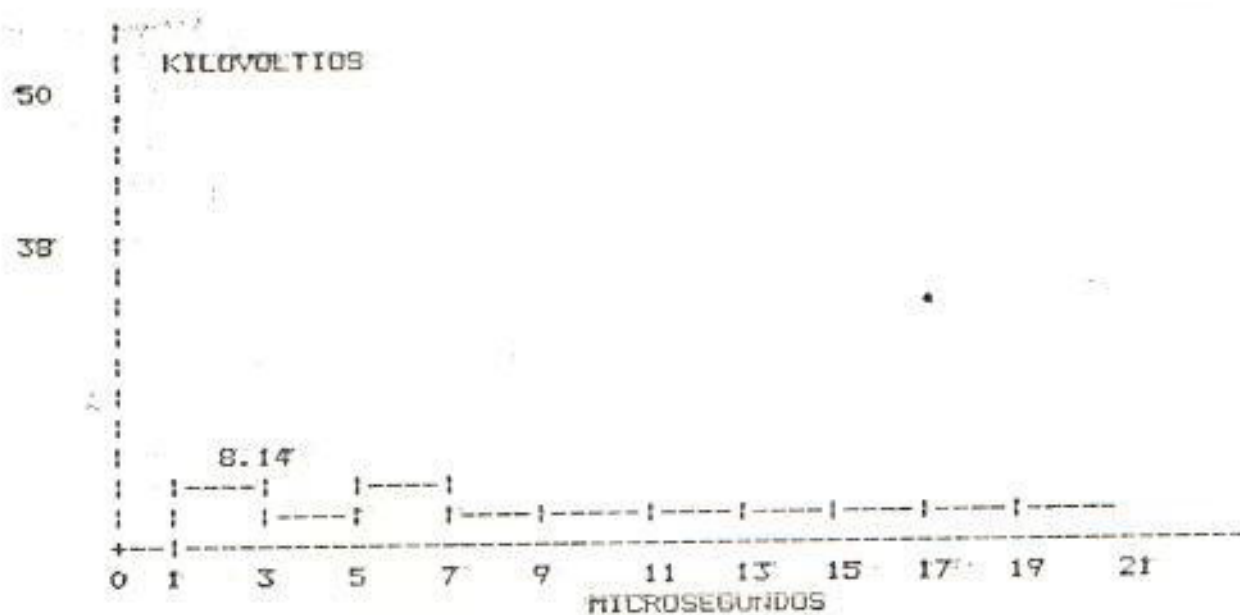
Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6;"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS X
 Posición del CAPACITOR 2
 Gráfico de la posición 1

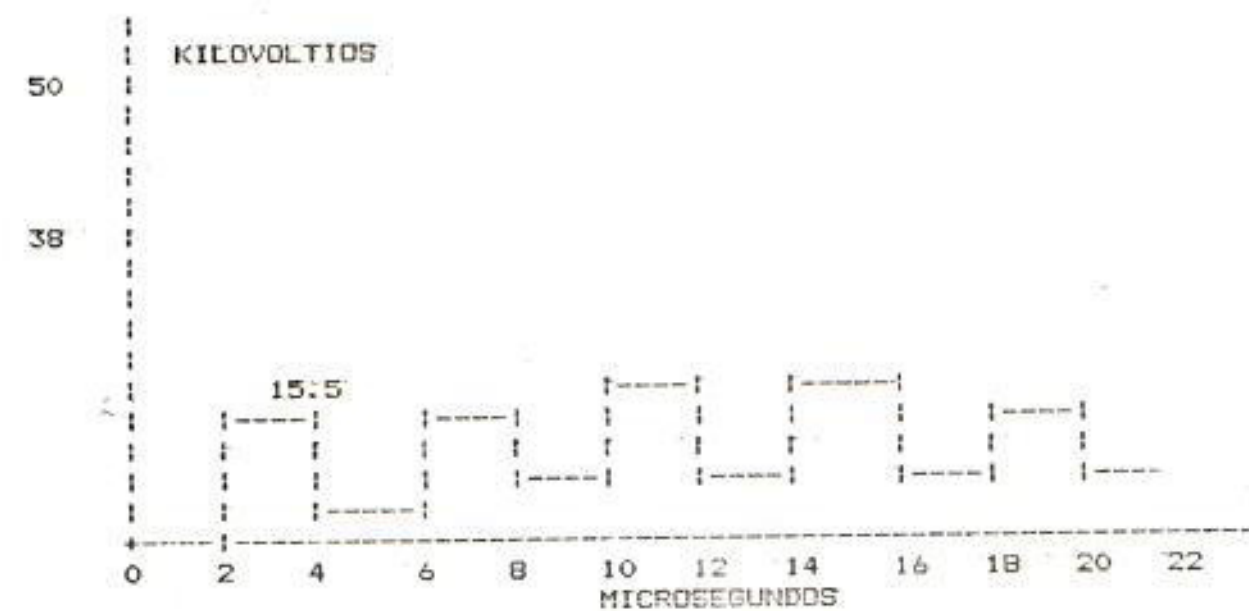
Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD 4SAVE 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS X
 Posición del CAPACITOR 2
 Gráfico de la posición 2

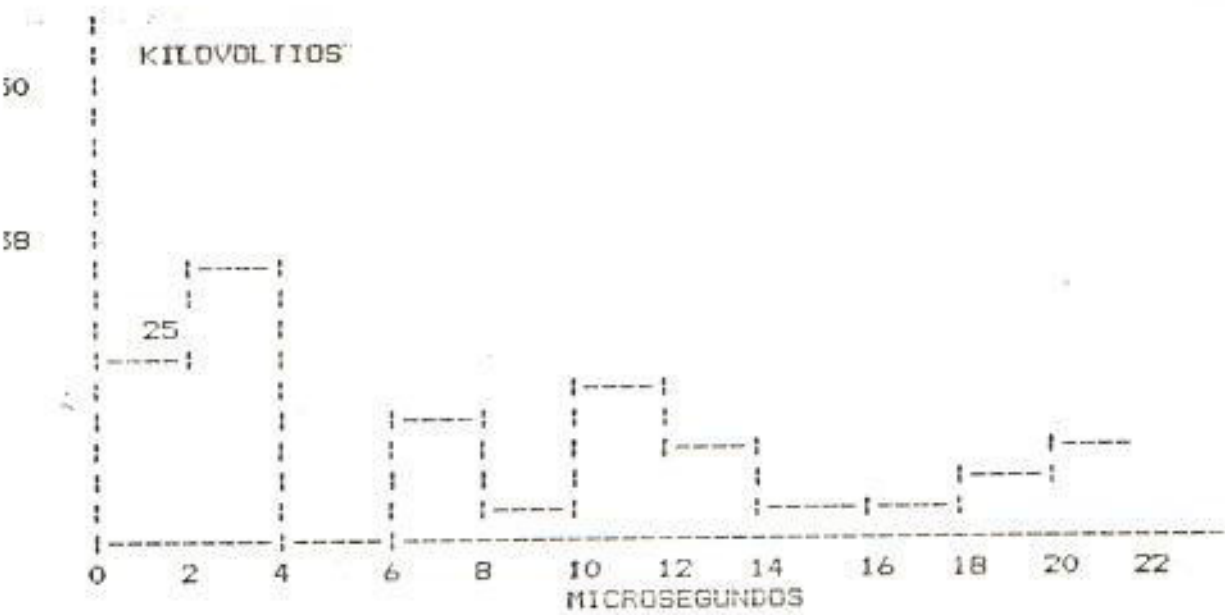
Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6;"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS X
 Posición del CAPACITOR 2
 Gráfico de la posición 3

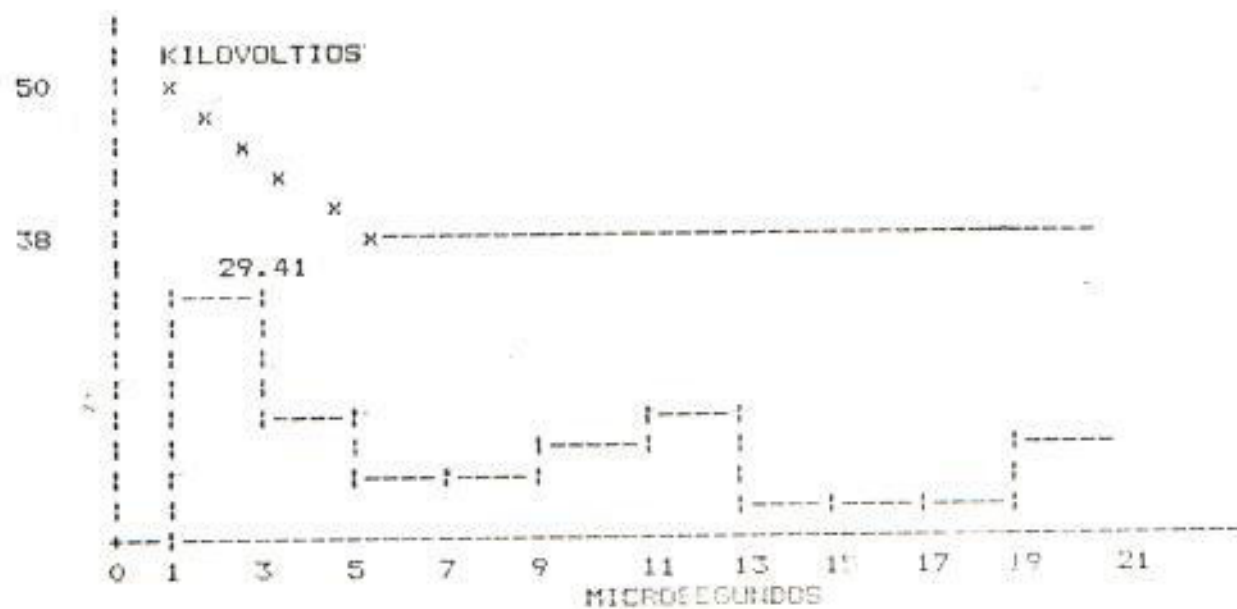
Gráfico del Computador



2RUN 3LDAD* 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF 9KEY 0SCREEN:

Posición del PARARRAYOS X
 Posición del CAPACITOR 3
 Gráfico de la posición 1

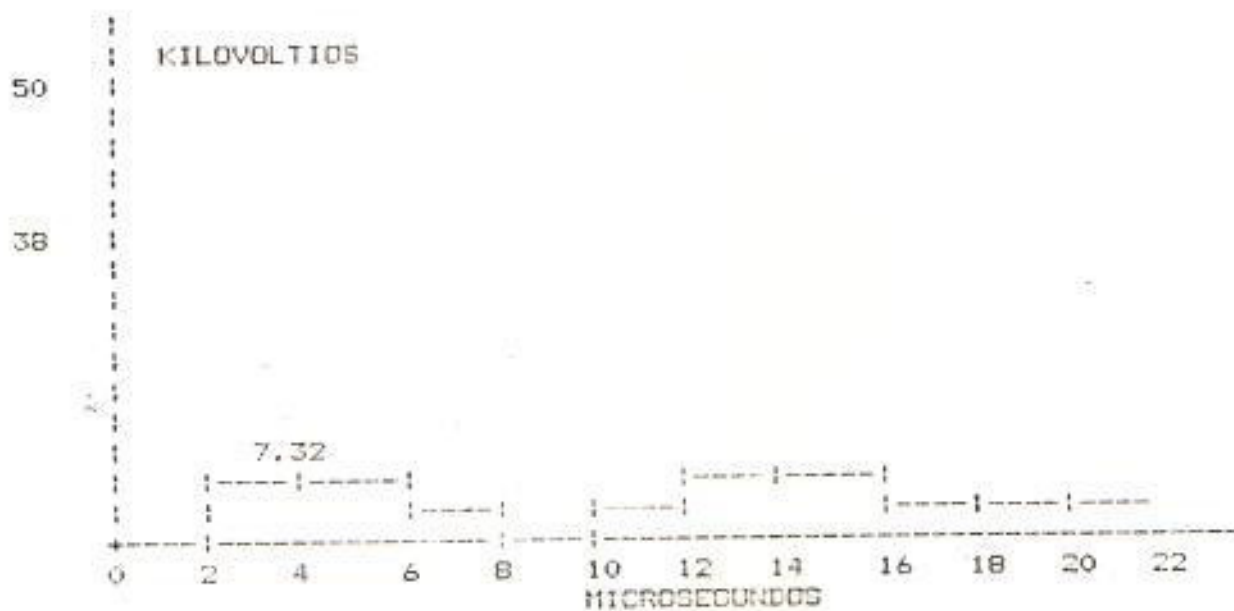
Gráfico del Computador



1 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS X
 Posición del CAPACITOR 3
 Gráfico de la posición 2

Gráfico del Computador



ST 2RUN 3LOAD" 4SAVE" 5CONT 6,"LPT1 7TRON 8TROFF9KEY 0SCREEN

Posición del PARARRAYOS X
 Posición del CAPACITOR 3
 Gráfico de la posición 3

Gráfico del Computador

Los resultados pueden resumirse en el siguiente cuadro:

	1/0	2/0	3/0	1/1	2/1	3/1	X/2	X/3*
Máximo sobrevoltaje en la posición 1	40,73	52,89	62,80	33,94	37,97	37,09	25,00	33,66
Máximo sobrevoltaje en la posición 2	56,33	43,45	58,57	47,93	43,45	35,83	8,14	29,41
Máximo sobrevoltaje en la posición 3	63,36	56,02	46,18	56,02	56,02	46,18	18,39	9,53
Instaló el Pararrayos	SI	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO
Máximo sobrevoltaje en cond. #1	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
Máximo sobrevoltaje en cond. #2	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	29,41	13,56	29,41
Máximo sobrevoltaje en el motor	56,02	58,48	46,18	67,75	58,48	46,18	22,16	19,21

Tabla 5.11

RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE LA EJECUCION DEL PROGRAMA

A/B: Pararrayos en la posición A, y Capacitor en la posición B.

La posición "0" indica que no se instala el equipo protector.

La posición "X" indica que se puede instalar en cualquier posición.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo presenta fundamentos teóricos, criterios y guías prácticas para la protección de sistemas contra sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas. Se han hecho a sí mismo las simplificaciones que la práctica aconseja y la experiencia determina en estudios de fenómenos transientes o riginados externamente.

El programa de computación elaborado se basa en el método de lattice o método de Bewley, y puede ser usado para diferentes casos:

- 1.- Calcular sobrevoltajes transientes cuando no se ubican equipos de protección en el sistema.
- 2.- Calcular sobrevoltajes transientes cuando se ubica un pararrayos en el sistema.
- 3.- Calcular sobrevoltajes transientes cuando se ubican parararrayos y capacitores de protección en el sistema.

Es importante notar que el programa es sólo aplicable a un sistema radial con no más de cuatro valores diferentes de impedancias características y con tiempos de propagación similares en las dos primeras secciones del circuito (estas suposiciones son justificables pues suelen existir en la prácti-

ca).

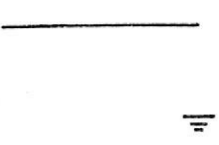
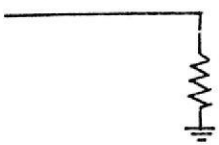
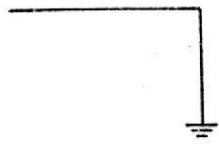
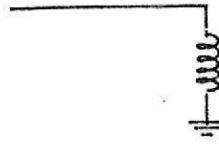
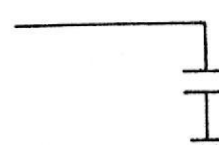
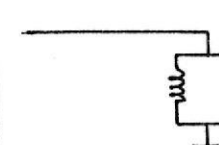
En lo posible, deben colocarse los equipos de protección lo más cercano al equipo a proteger, sin descuidar los sobrevoltajes que pueden originarse en sitios lejanos.

Los capacitores disminuyen la rata de crecimiento de la onda, evitando, en ciertos casos, la operación de un pararrayos, y limitando los valores de sobrevoltajes.

Un próximo paso en el desarrollo de este trabajo sería la elaboración de un programa que calcule sobrevoltajes en sistemas mallados.

APENDICE A

ONDAS GENERADAS PARA DIFERENTES SITUACIONES.

Situación	Onda Reflejada	α	β	A
	$V_2 = V_1$	---	---	---
	$V_2 = \frac{R-Z}{R+Z} V_1$	---	---	---
	$V_2 = -V_1$	---	---	---
	$V_2 = (1)$	$\frac{Z}{L}$	$\frac{Z}{L}$	1
	$V_2 = (1)$	$\frac{1}{CZ}$	$\frac{1}{CZ}$	-1
	$V_2 = (1)$	$\frac{ZR}{L(R-Z)}$	$\frac{ZR}{L(R+Z)}$	$\frac{R-Z}{R+Z}$

Situación	Onda Reflejada	α	β	A
	$V_2 = (I)$	$\frac{R-Z}{ZRC}$	$\frac{R+Z}{ZRC}$	-1
	$V_2 = (II)$	$\frac{-1}{2CZ}$	$\frac{1}{2CZ}$	-1
	$V_2 = (II)$	$\frac{Z-R}{2RCZ}$	$\frac{Z+R}{2RCZ}$	-1
	$V_2 = (I)$	$\frac{1}{C(Z-R)}$	$\frac{1}{C(Z+R)}$	$\frac{R-Z}{R+Z}$
	$V_2 = (I)$	$\frac{Z-R}{L}$	$\frac{Z+R}{L}$	1
	$V_2 = (II)$	$\frac{-Z}{2L}$	$\frac{Z}{2L}$	1
	$V_2 = (II)$	$\frac{R-Z}{2L}$	$\frac{R+Z}{2L}$	1

CONDICIONES TERMINALES EN UNA LINEA MONOFASICA

Tabla A.1

donde:


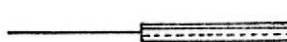

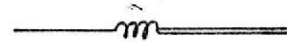
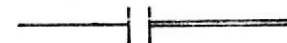

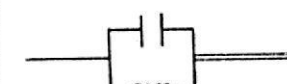

$$(I) : E.A \left[\frac{a+\alpha}{a-\beta} e^{-at} - \frac{\alpha+\beta}{a-\beta} e^{-\beta t} \right]$$

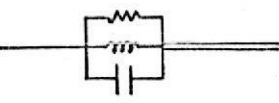
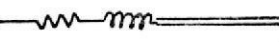
$$(II) : E.A \left[\frac{w_0^2 - 2a\alpha + a^2}{w_0^2 - 2a\beta + a^2} e^{-at} + \frac{2(\alpha-\beta) \cdot e^{-\beta t}}{w_0^2 - 2a\beta + a^2} \right] \left[(w_0^2 - a\beta) \operatorname{sen} wt + a w \operatorname{cos} wt \right]$$

$$V1 = E \cdot e^{-at}$$

$$w_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$$w^2 = w_0^2 - \beta^2$$

Situación	Ondas Reflejada y Transmitida	α	β	A
	$V_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} V_1$ $V_3 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} V_1$			
	$V_2 = \frac{1 - Z_1 Y_0}{1 + Z_1 Y_0} V_1$ $V_3 = \frac{2}{1 + Z_1 Y_0} V_1$	Y_0 : Admitancia total de todas las líneas salientes en paralelo.		
	$V_2 = \frac{Z_2 - Z_1 + R}{Z_2 + Z_1 + R} V_1$ $V_3 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1 + R} V_1$			
	$V_2 = (1)$ $V_3 = \frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	$\frac{Z_1 - Z_2}{L}$	$\frac{Z_1 + Z_2}{L}$	1
	$V_2 = (1)$ $V_3 = (1)$	$\frac{1}{C(Z_1 - Z_2)}$	$\frac{1}{C(Z_1 + Z_2)}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$
	$V_2 = (1)$ $V_3 = (1)$	$-\frac{R}{L} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{R - Z_1 + Z_2}$	$\frac{R(Z_1 + Z_2)}{L(R + Z_1 + Z_2)}$	$\frac{R + Z_2 - Z_1}{R + Z_2 + Z_1}$
	$V_2 = (1)$ $V_3 = (1)$	$\frac{1}{2C(Z_2 - Z_1)}$	$\frac{1}{2C(Z_2 + Z_1)}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$
	$V_2 = (1)$ $V_3 = (1)$	$\frac{R - Z_1 + Z_2}{RC(Z_1 - Z_2)}$	$\frac{R + Z_1 + Z_2}{RC(Z_1 + Z_2)}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$

Situación	Ondas Reflejada y Transmitida	α	β	A
	$V_2 = (II)$ $V_3 = (II)$	$\frac{Z_2 - Z_1 + R}{2RC(Z_2 - Z_1)}$ $\frac{1}{2RC}$	$\frac{Z_2 + Z_1 + R}{2RC(Z_2 + Z_1)}$ $\frac{Z_2 + Z_1 + R}{2RC(Z_2 + Z_1)}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$ $\frac{Z_2 Z_1}{Z_2 + Z_1}$
	$V_2 = (I)$ $V_3 = \frac{-2Z_2}{(a-\rho)L} (e^{-at} - e^{-\beta t})$	$\frac{Z_1 - Z_2 - R}{L}$	$\frac{Z_1 + Z_2 + R}{L}$ $\frac{Z_1 + Z_2 + R}{L}$	1

UNIONES ENTRE CONDUCTORES DE LINEA MONOFASICA

Tabla A.2

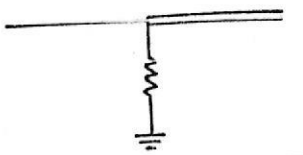
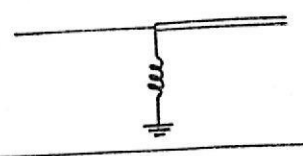
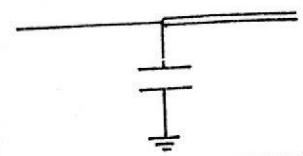
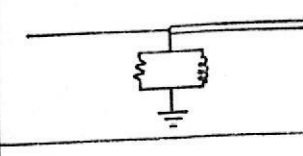
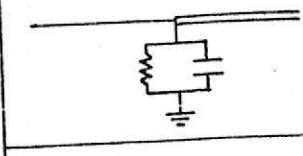
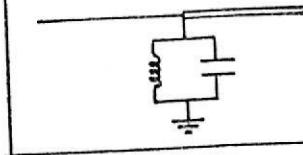
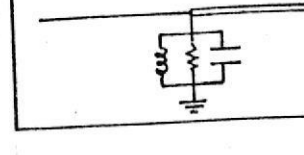
donde:

$$(I) : EA \left[\frac{a+\alpha}{a-\beta} e^{-at} - \frac{\alpha+\beta}{a-\beta} e^{-\beta t} \right]$$

$$(II) : EA \left[\frac{\omega_0^2 - 2a\alpha + a^2}{\omega_0^2 - 2a\beta + a^2} e^{-at} + \frac{2(\alpha-\beta) \cdot e^{-\beta t}}{\omega(\omega_0^2 - 2a\beta + a^2)} \left[(\omega_0^2 - a\beta) \text{sen}\omega t + a\omega \text{cos}\omega t \right] \right]$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$$

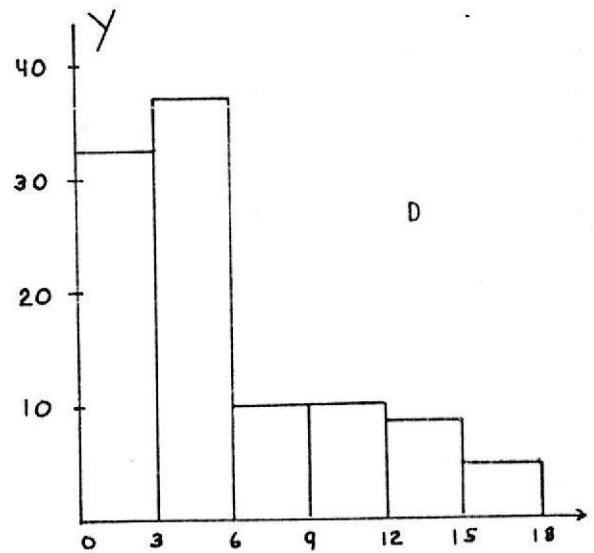
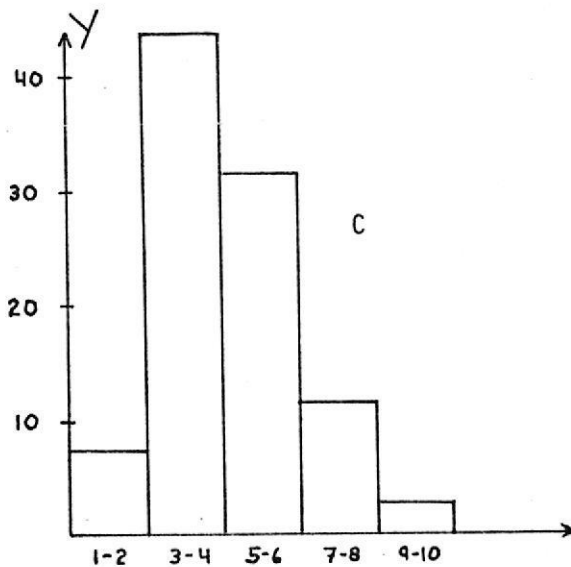
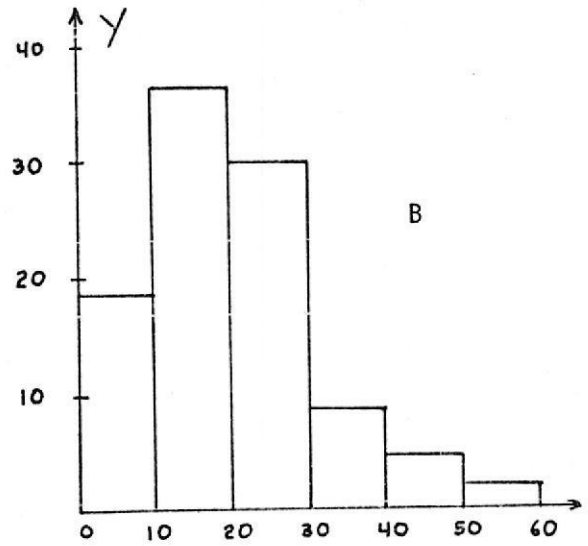
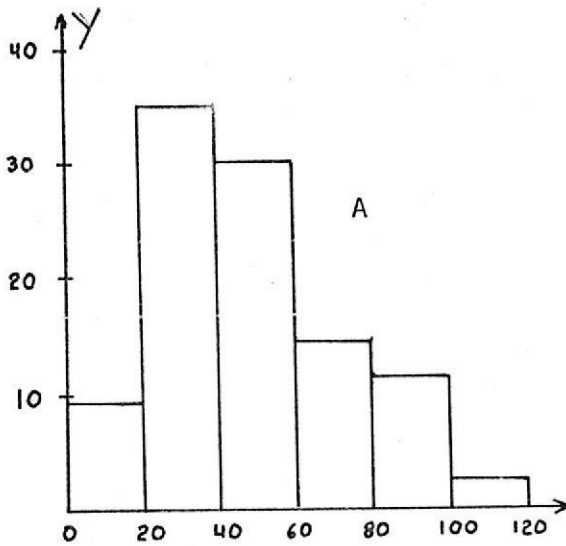
Situación	Ondas Reflejada y Transmitida	α	β	A
	$V_2 = \frac{Z_2 R - Z_1 R - Z_1 Z_2}{Z_2 R + Z_1 R + Z_1 Z_2} V_1$ $V_3 = \frac{Z_2 Z_2 R}{Z_2 R + Z_1 R + Z_1 Z_2} V_1$			
	$V_2 = (I)$ $V_3 = \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} \frac{E}{\alpha} (ae^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	$\frac{Z_1 Z_2}{L(Z_2 - Z_1)}$	$\frac{Z_1 Z_2}{L(Z_2 + Z_1)}$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$
	$V_2 = (I)$ $V_3 = -E \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 Z_2 C}$	$\frac{Z_2 + Z_1}{Z_1 Z_2 C}$	-1
	$V_2 = (I)$ $V_3 = V_1 + V_2$	$\frac{R Z_1 Z_2}{L(R Z_2 - R Z_1 - Z_1 Z_2)}$	$\frac{R Z_1 Z_2}{L(R Z_2 + R Z_1 + Z_1 Z_2)}$	
	$V_2 = (I)$ $V_3 = -E \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$	$\frac{R Z_2 - R Z_1 - Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 R C}$	$\frac{R Z_2 + R Z_1 + Z_1 Z_2}{Z_1 Z_2 R C}$	-1
	$V_2 = (II)$ $V_3 = V_1 + V_2$	$\frac{Z_1 - Z_2}{2 Z_1 Z_2 C}$	$\frac{Z_1 + Z_2}{2 Z_1 Z_2 C}$	-1
	$V_2 = (II)$	$\frac{Z_1 R - Z_2 R + Z_1 Z_2}{2 Z_1 Z_2 R C}$	$\frac{Z_1 R + Z_2 R + Z_1 Z_2}{2 Z_1 Z_2 R C}$	-1

UNIONES EN LINEAS MONOFASICAS

Tabla A.3

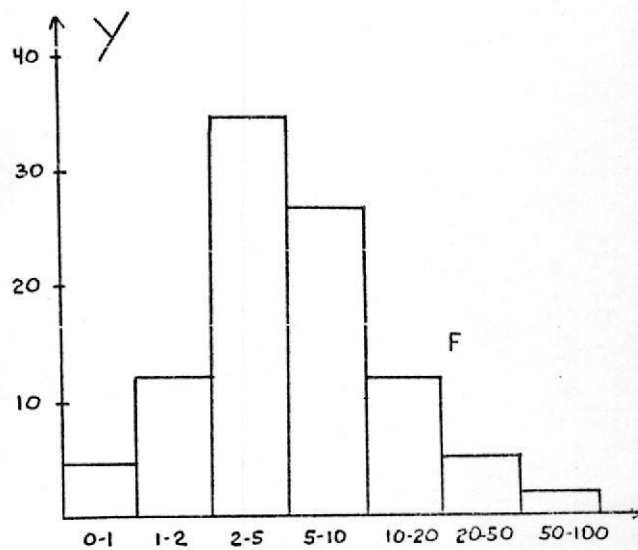
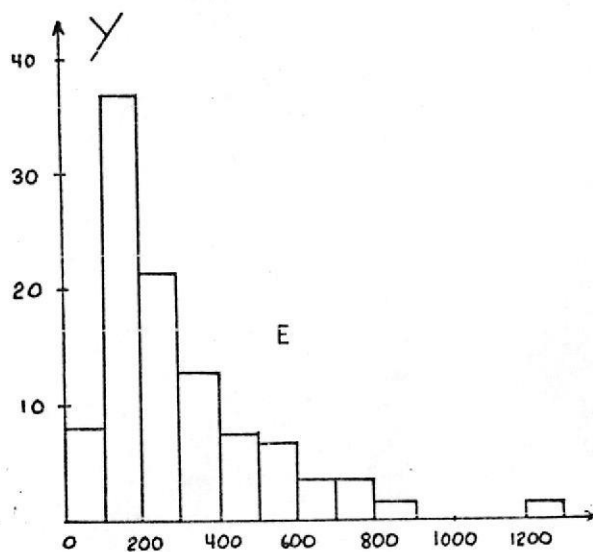
APENDICE B

DATOS ESTADISTICOS.



Y : Probabilidad de ocurrencia (%).

Datos estadísticos de: -A: corriente de descarga atmosférica en KA.
 -B: duración de la corriente de descarga en μ s.
 -C: tiempo para llegar al valor pico de corriente en μ s.
 -D: máxima rata de crecimiento en KA/ μ s.



Y : Probabilidad de ocurrencia.

Datos estadísticos de: -E: máximo sobrevoltaje de descarga en KV.
 -F: tiempo para llegar al valor pico de voltaje en μ s.

PRUEBAS QUE SE REALIZAN A PARARRAYOS

- 1.- El mínimo voltaje de operación se establece con la Prueba de Operación a Frecuencia nominal, que consiste en aplicar un sobrevoltaje, que se eleva gradualmente, hasta que se produzca la operación en el pararrayos.
- 2.- La característica de operación ante impulsos de descargas atmosféricas es obtenida probando con impulsos 1,2/50 microsegundos. Se inclina el frente de onda hasta llegar a 100 KV/microsegundos por cada 12 KV de valor nominal del pararrayos, pero con un máximo de 12 mil Kilovoltios.
- 3.- La característica de operación ante impulsos de maniobra se obtiene aplicando al pararrayos 3 formas de onda de ambas polaridades y con magnitudes sobre los 100 KV. Las formas de onda que se aplican son las siguientes: 30/60, 150/300, 100/2000 microsegundos.
- 4.- La característica de descarga establécese por lo menos para 3 valores de corriente: 0,1; 1 y 2 veces la corriente de descarga con una forma de onda de 8/20 microsegundos.
- 5.- La prueba de Alta Corriente Poca Duración consiste en aplicar 2 descargas de sobrecorriente (65 KA de pico en pararrayos de distribución e intermedios y 100 KA de pico para los tipo estación) con ondas (4-8)/(10-20) microsegundos.
- 6.- La prueba de Baja Corriente Larga Duración consiste en aplicar una onda del tipo rectangular; el pararrayos tipo distribución debe soportar corrientes cerca de 100 A en tiempos alrededor de 1000 micro

segundos como mínimo. Esta prueba determina la capacidad de los bloques resistores para soportar las descargas de maniobra o "rayos calientes".

- 7.- La prueba del ciclo de trabajo consiste en colocar el pararrayos en una fuente de frecuencia nominal y aplicar impulsos de elevadas magnitudes de corriente una vez por minuto durante 20 ó 24 minutos (10 KA con ondas 8/20 microsegundos). Esta prueba demuestra la durabilidad del pararrayos (tolerancia a las altas corrientes de impulso) y además la habilidad para recuperarse luego de la operación.

APENDICE C

CARACTERISTICAS DE PROTECCION DE PARARRAYOS

NOTA: Las siguientes tablas son tomadas de catálogos de fabricantes de pararrayos, y pueden ser usadas como guía. Los valores indicados son los máximos de los máximos indicados por diferentes fabricantes para cada tipo de pararrayos.

Voltaje Nominal (KV)	Volt. Oper. en frente Rata Crecim. del voltaje (KV/ s)	KV pico	Volt. Desc. ondas corr. 8/20		
			5000 A	10000 A	20000 A
3	25	12	8,5	9	10
6	50	24	17	19	20
9	75	35	24	26	28
12	100	45	32	35	38
15	125	55	40	44	47
21	175	72	55	60	65
24	200	90	65	71	76
30	250	105	80	87	94
36	300	125	96	105	113
39	325	130	104	114	123
48	400	155	130	142	153
60	500	190	160	174	189
72	600	230	195	212	230
90	750	290	240	262	283
96	800	304	258	280	304
108	900	340	282	316	333
120	1000	370	320	350	378
144	1200	440	375	408	440

CARACTERISTICAS DE PROTECCION DE PARARRAYOS
TIPO VALVULA-ESTACION

Tabla C.1

Voltaje Nominal (KV)	Volt. Oper. en frente Rata Crecim. del voltaje (KV/ s)	KV pico	Volt. Desc. ondas corr. 8/20		
			5000 A	10000 A	20000 A
3	25	12	10	10,8	12,5
6	50	24	19,6	21,6	24,5
9	75	35	29	32	36
12	100	45	36,5	40,5	48
15	125	55	46	51	60
21	175	72	63	70	83
24	200	90	76	84	95
30	250	105	90	100	118
36	300	125	116	129	143
39	325	130	125	139	164
48	400	155	152	169	188
60	500	190	180	200	233
72	600	230	230	255	282
90	750	283	274	302	349
96	800	300	296	328	372
108	900	335	338	375	417
120	1000	370	375	415	463

CARACTERISTICAS DE PROTECCION DE PARARRAYOS
TIPO VALVULA-INTERMEDIO

Tabla C.2

Voltaje Nominal (KV)	Volt. Oper. en frente Rata Crecim. del voltaje (KV/ s)	KV pico	Volt. Desc. ondas corr. 8/20		
			5000 A	10000 A	20000 A
3	25	25	12,4	13,8	15,5
6	50	35	23	26	30
9	75	50	36,5	41	46
10	83,3	50	38	45	53
12	100	61	46	52	60
15	125	76	55	64	74,5
18	150	91	66	76,5	90
21	175	106	77,5	87	104
27	225	105	99	114	134
30	250	112	110	126	147

CARACTERISTICAS DE PROTECCION DE PARARRAYOS
TIPO VALVULA-DISTRIBUCION

Tabla C.3

Voltaje Nominal (KV)	Volt. Oper. en frente Rata Crecim. del voltaje (KV/ s)	KV pico	Volt. Desc. ondas corr. 8/20	
			1500 A	5000 A
0,175	10	3,75	2,3	2,8
0,650	10	5,80	3,8	4,8

CARACTERISTICAS DE PROTECCION DE PARARRAYOS
TIPO VALVULA-SECUNDARIOS

Tabla C.4

BIBLIOGRAFIA

1. BEWLEY, L. Travelling waves on transmission systems, Dover, New York, 1963, 543 p.
2. CROFT, CARR Y WATT. American electricians' handbook, Reverté, Barcelona, 1974.
3. DIESENDORF, W. Insulation co-ordination in high voltage electric power systems, Crane, Russak & Company, New York 1970, 127 p.
4. ELGERD, O. Electric energy systems theory, McGraw Hill, New York, 1982, 533 p.
5. GREENWOOD, A. Electrical transients in power systems, Wiley & sons, New York, 1971, 544 p.
6. SEBO, S. Modern methods of analysis and protection of electric power systems, Universidad de Ohio.
7. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, Electrical transmission and distribution, Pittsburgh, 824 p.
8. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, Distribution Systems, Pittsburgh, 567 p.



A.F. 141593